

# 基于定常射流的有车轮方背 Ahmed 模型 主动气动减阻

杨志刚<sup>1,2,3</sup>, 任静<sup>1,2</sup>, 夏超<sup>1,2,4</sup>, 李元枢<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; 4. 同济大学南昌汽车创新研究院, 南昌 330052)

**摘要:** 近年来, 主动流动控制技术已用于汽车气动减阻研究, 但较多针对无车轮的简化汽车模型开展且减阻量和净节率均有待提高。本研究针对原始及带有静止、旋转车轮的方背 Ahmed 汽车模型, 采用数值模拟方法, 在模型背部施加定常射流进行主动气动减阻规律的研究。首先, 分析无射流工况下车轮对方背 Ahmed 汽车模型气动特性的影响; 其次, 重点探究有车轮工况下, 射流槽布置形式、射流角度、动量系数等因素对气动阻力的影响规律。获得背部射流的最佳工况为: 采用连续且距边缘较近的射流槽, 射流角度 45°, 动量系数 3%, 减阻量可达 9.5%, 对应净节率为 12.7 W。

**关键词:** 车辆工程; 主动流动控制; 定常射流; 气动减阻; 车轮; 方背 Ahmed 模型

中图分类号: U461.1; O355

文献标志码: A

## Active Drag Reduction of a Square-Back Ahmed Body with Wheels Based on Steady Blowing

YANG Zhigang<sup>1,2,3</sup>, REN Jing<sup>1,2</sup>, XIA Chao<sup>1,2,4\*</sup>, LI Yuanshu<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; 4. Nanchang Automotive Institute of Intelligence and New Energy, Nanchang, 330052, China)

**Abstract:** In recent years, active flow control has been applied to study the drag reduction of vehicles. However, most researches only aim at some simplified vehicle models without wheels. In addition, the amount of drag reduction and net saved energy both still need to be further improved. In this paper, based on steady blowing on the base, the active drag reduction is numerically studied on three square-back Ahmed models, i. e., the

original Ahmed model, the Ahmed model with stationary wheels, and the Ahmed model with rotating wheels, respectively. First, this paper explores in detail the effect of wheels on aerodynamic characteristics without jet flow. Then, it focuses on the influence of the form of jet groove, jet angle, and momentum coefficient on the drag under wheel conditions. It is concluded that the optimum conditions are as follows: when the form of jet groove is continuous and is close to the edge of the rear of model, the jet angle is 45° and the momentum coefficient is 3%, the corresponding drag reduction and net saved energy can reach 9.5% and 12.7W, respectively.

**Key words:** vehicle engineering; active flow control; steady blowing; drag reduction; wheels; square-back Ahmed model

为了满足愈发严格的油耗法规和排放标准的要求, 汽车制造商必须更快速地着力发展汽车的节能减排新技术。研究表明<sup>[1]</sup>, 汽车的气动阻力减少 10%, 对应燃油消耗可减少约 5%。因此, 改善汽车的空气动力学性能可以显著地降低油耗, 同时减少排放。与轿车相比, 商用车(如用于商业运输的货车、挂车、客车等)往往具有更大的气动阻力和燃油消耗, 这主要是由于方背形体导致气流在尾部发生大分离, 产生复杂的三维非定常湍流尾迹, 进而诱导背部产生较高负压, 使得压差阻力成为其气动阻力的主要来源<sup>[2-3]</sup>, 并且随着车速的不断提高, 车辆为克服空气动力学阻力所消耗的能量也随之大幅增加。因此, 降低方背体车辆的气动阻力, 对于实现节能减排以及提高新能源汽车的续航里程都有着非常重要的意义。

收稿日期: 2021-11-10

基金项目: 上海市重点实验室项目(18DZ2273300); 同济大学南昌汽车创新研究院前瞻课题(QZKT2020-12)

第一作者: 杨志刚(1961—), 男, 博士生导师, 工学博士, 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, 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

Ahmed 模型是一个最常用的研究汽车气动特性的三维钝体简化模型<sup>[4]</sup>,随着模型后倾角的改变,其尾迹的流动结构呈现不同的特点以及相互的耦合作用<sup>[4-5]</sup>,其中,后倾角为 $0^\circ$ 的方背 Ahmed 模型可以用来较好地模拟车体外形类似的商用车(如客车、厢式货车等)。对于方背 Ahmed 模型,超过一半以上的压差阻力来自其背部<sup>[4]</sup>。因此,开展针对方背 Ahmed 模型尾部的气动减阻技术研究,对于商用车减阻有着重要的指导意义和科研价值。而目前方背类车体模型减阻主要分为被动减阻和主动减阻措施。被动控制措施通常是在原始模型基础上,通过增加一些附加装置来影响尾迹流动,进而实现减阻。常见的被动减阻措施有背部空腔、船尾型结构、背部倾斜挡板、垂直分隔板等<sup>[2]</sup>。Khalighi 等<sup>[6-7]</sup>通过仿真和实验研究表明安装船尾结构后,方背体模型的背部回流区长度变短且宽度变窄,同时背压显著提升,最大减阻量达到 30%。范亚军等<sup>[8]</sup>通过风洞实验研究表明方背 Ahmed 模型尾迹的双稳态现象随着船尾长度的增加逐渐被抑制,尾迹涡结构趋于对称,涡脱落强度减弱,继而造成背压提升,气动阻力减小。尽管,被动装置的减阻效果很显著,但是因为需要大量几何修改,而且在不需要的时候不能“关闭”,因此其工业应用仍然受到限制。而主动减阻措施由于具有无需改变外形,环境适应性好和易实现闭环控制等优点,近年来愈发受到重视。它与被动减阻措施的区别在于主动射流技术需要额外的能量输入,按照控制是否需要反馈信号,分为开环控制和闭环控制;按照射流激励器的不同,分为定常射流、脉冲射流、振荡射流和等离子射流等。Roumeas 等<sup>[9]</sup>采用基于格子玻尔兹曼的数值方法,针对方背体采用定常射流方式,最优减阻效果可达 29%,且当射流角度为 $45^\circ$ 时,减阻效果最好。Barros 等<sup>[10]</sup>在方背体背部边缘采用连续射流槽进行脉冲射流,增加了回流区长度进而实现 10% 的减阻,当结合 Coanda 效应时,高频激励最高可实现 20% 减阻。尽管针对方背模型,应用主动射流方法进行减阻已开展了许多的研究工作,但仍存在以下不足之处:现有研究大多是基于使用支撑杆的原始方背 Ahmed 模型,与具备车轮、轮腔、车轴等复杂结构的实车相比仍有很大差距。而 Wang 等<sup>[12]</sup>对带有旋转车轮的车辆进行空气动力学实验研究,结果表明后轮尾流不仅对车身底部气流有影响,同时会和车辆尾流相互作用,从而对车辆背部施加压力条件来影响车辆的阻力。此外,目前应用主动射流进行减阻技术还不成熟,减阻量和净节

率相互矛盾,未投入实际应用,仍需探索最优的控制方法和策略。

因此,本文针对原始及带有静止、旋转车轮的 1/2 缩比的方背 Ahmed 模型,利用基于雷诺平均的数值模拟方法,通过在模型背部施加定常射流进行气动减阻研究,雷诺数为 $1 \times 10^6$ 。本文首先对比了在无射流工况下,有无车轮及车轮旋转对方背 Ahmed 模型的气动特性的影响;此外,重点探究了有车轮情况下,射流槽布置形式、射流角度和动量系数对气动阻力的影响规律。

## 1 模型参数设置

### 1.1 几何模型参数设置

图 1 展示了本研究采用的汽车标准模型,图 1a 和图 1b 分别是 1/2 缩比的原始(简称 Ahmed 模型)和有车轮(静止/旋转)的方背 Ahmed 模型(其中,stationary wheels 简称 SW, rotating wheels 简称 RW),长度 $L=522.0$  mm,宽度 $W=194.5$  mm,高度 $H=169.0$  mm。对于增添车轮的方背 Ahmed 模型,车轮区域各尺寸的确定方法如下:轴距、轮距与原始方背 Ahmed 模型中的支撑杆之间的距离一致,即轴距为 317.5 mm、轮距为 165.75 mm。以下数据综合参考主流 MPV 车型实车数据确定:车轮直径为 78.75 mm、轮胎宽度为 28.75 mm、车轴直径为 12 mm、轮腔深度为 45 mm。

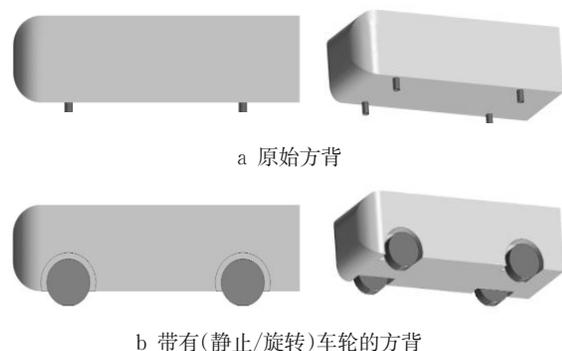


图 1 Ahmed 模型

Fig.1 Ahmed model

### 1.2 射流参数设置

#### 1.2.1 射流槽布置形式

关于模型背部射流槽布置形式的影响,主要研究射流槽的连续性<sup>[13]</sup>和射流槽距离模型背部边缘的远近这两个因素。具体工况包括离散射流槽(actuators)和连续射流槽(slits),距离背部边缘的距离为 6.5mm (large) 和 2mm (small)。图 2 展示了设

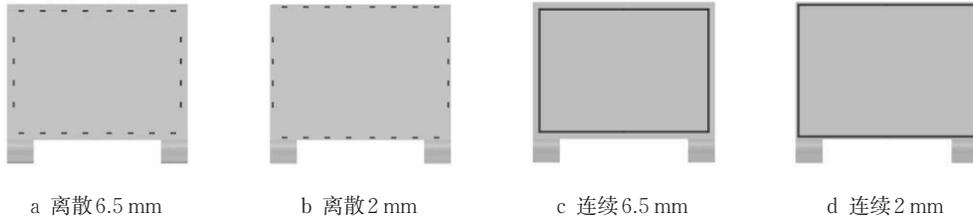


图2 4种射流槽布置形式

Fig.2 Four types of jet groove arrangement

定的两种参数组合后的4种射流槽布置形式,分别为 rear-actuators-large (RAL)、rear-actuators-small (RAS)、rear-slits-large (RSL)、rear-slits-small (RSS)。其中,槽宽均为2 mm。

### 1.2.2 射流角度

如图3所示,在模型背部施加定常射流的射流角度定义如下:当背部射流垂直于模型背部向后时,定义其射流角度 $\theta=0^\circ$ ;当射流向模型背部中心偏转时,定义其射流角度 $\theta$ 为正值,反之为负值。

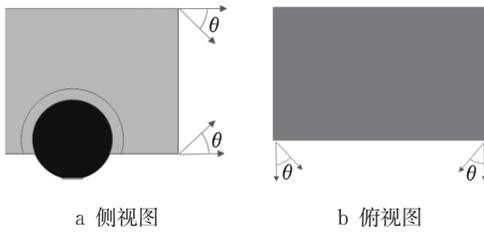


图3 模型背部射流角度定义

Fig.3 Definition of jet angle at the back of model

### 1.2.3 动量系数

主动射流需要能量输入,本研究使用动量系数 $C_\mu$ 表征输入的射流能量大小,其定义如下:

$$C_\mu = \frac{2A_{\text{nozzles}} U_{\text{jet}}^2}{A_0 U_\infty^2} \quad (1)$$

式中: $A_{\text{nozzles}}$ 为正在工作的射流槽面积之和, $\text{m}^2$ ;  $A_0$ 为模型在 $x$ 方向的投影面积, $\text{m}^2$ ;  $U_{\text{jet}}$ 为射流速度, $\text{m/s}$ ;  $U_\infty$ 为来流速度, $\text{m/s}$ 。

### 1.2.4 减阻量

气动阻力系数 $C_d$ 的定义如下:

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

减阻量 $\Delta C_d$ 是用来表征使用射流进行主动控制后,相较于无射流基础工况,阻力值减小的程度,其定义如公式(3)所示:

$$\Delta C_d = \frac{C_{d0} - C_{d1}}{C_{d0}} \times 100\% \quad (3)$$

式中: $C_{d0}$ 为无射流基础工况的阻力值, $C_{d1}$ 为采用射流工况的阻力值。

### 1.2.5 净节率

由于主动射流需要额外的能量输入,因此采用净节约功率 $\Delta P$ (简称净节率)来表征使用射流进行主动控制的实际收益,即减阻带来的收益减去使用射流所需的能量的差值,其定义如下:

$$\Delta P = \frac{1}{2} \rho_0 U_\infty^3 A_0 (C_{d0} - C_d) - \frac{1}{2} \rho_{\text{jet}} U_{\text{jet}}^3 A_{\text{nozzles}} \quad (4)$$

式中: $\rho_0$ 为来流气体密度, $\text{kg/m}^3$ , $\rho_{\text{jet}}$ 为射流气体密度, $\text{kg/m}^3$ 。

## 2 计算参数设置

### 2.1 计算域及边界条件设置

如图4所示,对于Ahmed、SW、RW模型工况,计算域的设置一致:总体尺寸为 $11L \times 10W \times 6H$ ,入口到模型头部的距离是 $3L$ ,出口到模型尾部的距离是 $7L$ ,Ahmed和SW/RW的阻塞度分别为1.71%和1.75%。计算域边界条件设置如下:入口为速度入口,出口为压力出口,地面设置为无滑移壁面(SW)和移动壁面(RW),其他计算域边界为对称边界条件;此外,SW模型的车轮处设置为无滑移壁面,RW模型的车轮处采用旋转壁面法进行模拟;射流槽在无射流工况下设置为无滑移壁面,射流时设置为速度入口,这样可保证射流工况和无射流工况的网格一致。

### 2.2 计算方法设置

湍流模型采用基于雷诺平均方法的Realizable  $k-\epsilon$ 两方程模型<sup>[14]</sup>,之前的研究表明<sup>[15]</sup>,Realizable  $k-\epsilon$ 两方程模型在汽车外流场的流动模拟中有较优异表现。求解器是基于不可压缩的分离式求解器,对流项和扩散项均采用二阶迎风格式进行离散,压力速度耦合方法为SIMPLE算法,来流速度为30 m/s,雷诺数为 $1 \times 10^6$ ,壁面函数采用非平衡壁面函数,使得在有限网格数量下达到较为精确的数值模拟结果。

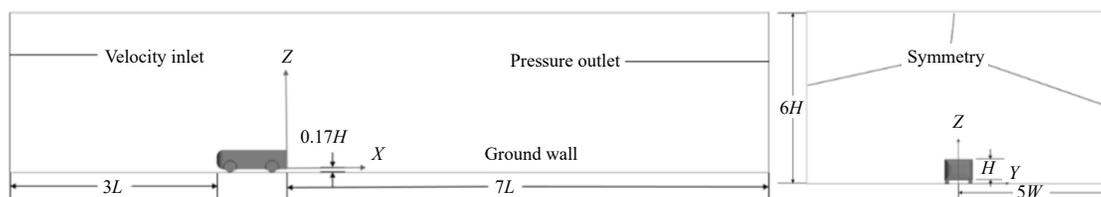


图4 计算域及边界条件

Fig.4 Computational domain and boundary conditions

### 2.3 网格无关性验证

针对 Ahmed 和 SW 模型分别设置 4 套不同尺寸的网格,以验证模型的网格敏感性,如表 1 所示。由表 1 可见,全局目标面网格尺寸均为 160 mm,全局最大、最小面网格尺寸为分别均为 160 mm 和 1.25 mm;体网格采用切割体网格,保证核心区网格为六面体网格,边界层网格第一层为 0.8 mm,增长率为 1.2,总共 5 层,总厚度 6 mm。同时,表 1 中还展示了两种模型在 4 套网格设置下的气动阻力系数  $C_d$  值。

可以看到,4 套网格计算得到的  $C_d$  值相差不大,而且在不同尺寸网格下,原始方背 Ahmed 模型计算的  $C_d$  与 Grandemange<sup>[16]</sup> 通过实验得到的  $C_d=0.274$  均吻合较好,误差在 3.6% 以内,这证明了对于原始方背 Ahmed 模型的数值计算方法是可靠的。因此,综合考虑计算精度和效率后,各模型工况均采用网格数次多(即网格 C)的设置,其中 RW 模型与 SW 模型的网格设置相同,所对应的网格分布和加密区如图 5 所示。

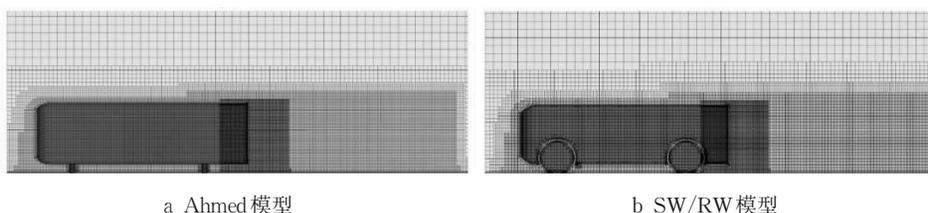


图5 模型体网格分布及加密区

Fig.5 Grid distribution and encryption area of each model body

表1 原始、静止车轮方背 Ahmed 模型的网格设置及  $C_d$  值对比Tab.1 Comparison of different grid settings and  $C_d$  values of between square-back models with stationary wheels

参数	网格 A		网格 B		网格 C		网格 D	
	原始	静止车轮	原始	静止车轮	原始	静止车轮	原始	静止车轮
全局目标面网格/mm	160							
全局最小面网格/mm	1.25							
车身表面尺寸/mm	5		2.5		2.5		2.5	
尾流加密区尺寸/mm	5		2.5		2.5		2.5	
车轮加密区尺寸/mm	5		2.5		2.5		1.25	
射流器加密区尺寸/mm	disable		disable		1.25		1.25	
网格数/万	115	140	406	428	664	690	1 119	1 171
$C_d$ (CFD)	0.275	0.386	0.270	0.379	0.265	0.376	0.264	0.376

## 3 仿真结果分析

### 3.1 无射流工况下车轮对气动特性的影响

#### 3.1.1 气动阻力系数对比分析

图 6 展示了无射流工况下三种模型整体及各部件的阻力值的对比情况。其中,SW 总阻力最高(0.376),RW 比 SW 略有降低(0.374),而 Ahmed 的总阻力最低(0.265)。

当把整车拆分为车身、背部、车轮/支撑杆 3 个

主要部分,分别研究其阻力值变化时发现,增设车轮后车身阻力值从 0.088 增加到了 0.124,但占整车阻力值的百分比维持在 33% 左右不变;车轮旋转使车身阻力略有减小,导致总阻力与静止车轮工况相比也有所降低;增设车轮后,背部阻力值略有降低,占整车阻力值的百分比从 57.7% 下降到 40% 左右,车轮旋转使背部阻力值增加到了略低于 Ahmed 的水平;相比于支撑杆,车轮的阻力值占整车阻力的百分比均大幅增加,例如阻力值从支撑杆的 0.025(占比

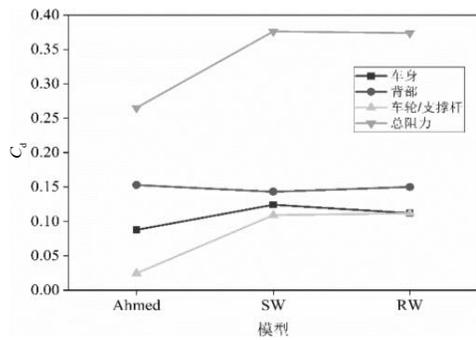


图6 无射流工况下3种模型的整体及各部件 $C_d$ 值

Fig.6  $C_d$  values of the whole and each component of the three models without jet flow

9.4%)增加到了旋转车轮的0.112(占比29%)。

### 3.1.2 压力场对比分析

图7展示了无射流工况下3种模型的车身及车轮前部的压力,发现SW模型相较于Ahmed模型,其车头圆弧位置的两侧和下边缘的压力有明显上升,尤其是靠近车轮处。其中车身头部下缘的压力上升最为显著,从而导致车身部件压差阻力增大。车轮旋转后,上述车头部位的压力略有降低。

### 3.1.3 中截面速度场和流线图对比分析

图8左侧展示了无射流工况下3种模型头部的中截面的速度场流线图分布。相较于Ahmed模型,添加静止车轮后,由于车轮横截面积相比于支撑杆更大,对前方自由来流的阻塞效果更明显,导致车头底部速度降低,使得车身头部下缘的压力有较为明显上升,从而导致车身部件压差阻力增大;车轮旋转

后,由于地面移动和旋转效应,使得车头底部速度有所增加,导致车身头部下缘压力有所降低,车身部件压差阻力相比Ahmed模型略有增加。图8右侧展示了无射流工况下不同模型尾部的中截面速度场。增设车轮后,车轮的横截面积相比于支撑杆更大,模型底部的气流流经的横截面积变小,导致车尾气流速度上升,加强了尾流区中靠近下部的涡,打破了尾流上下的平衡,增强了回流区气流冲击背部滞止点处的动能,使背压回升,阻力下降;车轮旋转后,模型底部气流速度虽继续增大,但由于尾流仍然维持着下部大于上部的状态,回流区长度略有增加(RW工况回流区长度 $x^*=1.80$ ,SW工况回流区长度 $x^*=1.77$ ,回流区长度以中截面尾迹区的长度进行度量且以高度H无量纲化),回流区气流冲击背部滞止点处的动能有所减弱,导致背压略有下降,阻力增加。

### 3.2 背部射流槽对减阻效果的影响

针对四种背部射流槽布置形式,选用SW模型、射流角度 $\theta=45^\circ$ 、动量系数 $C_\mu=3\%$ 的工况,比较其对于有车轮情况下的减阻效果。

#### 3.2.1 减阻量和净节率对比分析

图9分别展示了4种工况下的减阻量和净节率。对比可知,RSS减阻效果最佳,减阻量可达9.5%,净节率可达12.7W;RSL次之,减阻量为6.0%,净节率为6.5W;而RAL最差,增阻2.1%,净节率为-14.3W。可以看出,对于背部定常射流,采用连续射流槽减阻效果优于离散射流槽,且射流槽应尽可能靠近背部边缘布置较好。

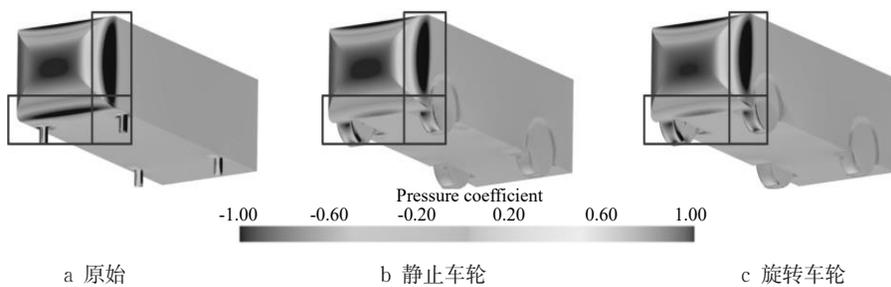


图7 无射流工况下3种方背Ahmed模型的车身及车轮前部压力分布

Fig.7 Pressure distribution of the body and wheel front of the three models without jet flow

### 3.2.2 背压分布对比分析

此外,图10展示了4种射流槽布置形式的背压分布。由图10a和图10c、图10b和图10d对比可以发现,连续射流槽工况相比于离散射流槽工况,背压回升幅度更大,同时离散槽工况下的射流槽附近会形成局部负压区,这是局部气流分离造成的二次涡结构使得背压降低所致;由图10a和图10b、图10c和

图10d对比可以看到,射流槽距离模型背部四周边缘越近,背压回升幅度越大。综上所述,选用连续且距边缘较近的射流槽布置形式减阻效果较好。

### 3.3 射流角度对减阻效果的影响

在以上研究基础上,选定距离边缘为2mm的连续射流槽,探究SW模型在动量系数 $C_\mu=3\%$ 时,背部射流角度变化对减阻效果的影响。

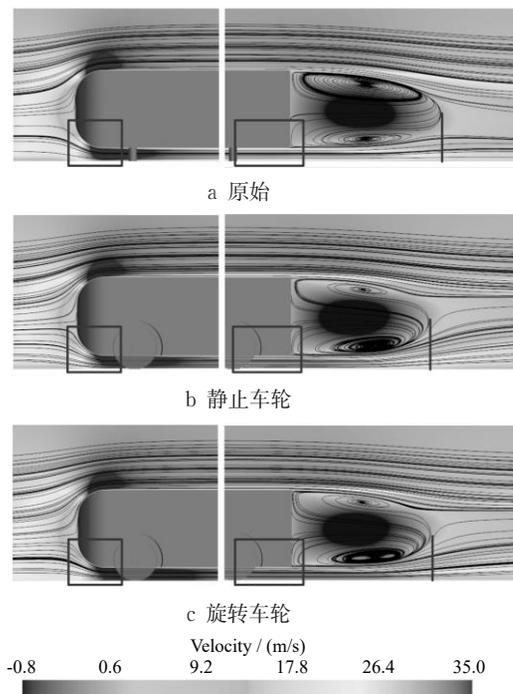


图8 无射流工况下3种方背Ahmed模型的中截面速度场流线图分布

Fig.8 Velocity field and streamlines distribution of the middle section of three square-back Ahmed models without jet flow

### 3.3.1 减阻量和净节率对比分析

图11展示了不同射流角度下的减阻量(左轴)和净节率(右轴)。由图可知,当射流角度 $\theta$ 为 $30^\circ \sim 45^\circ$ 时,减阻效果较好,减阻量达9.5%,净节率达12.7 W;当 $\theta=0^\circ$ 和 $\theta=60^\circ$ 时,减阻效果较差,如 $\theta=60^\circ$ 时,减阻量下降至5.2%,净节率下降至5.2 W。

### 3.3.2 背压分布对比分析

图12展示了不同射流角度所对应的背部压力分布(图右侧),并和无射流基础工况进行对比(图左侧),以此说明射流角度对背部压力的影响。首先,与基础工况相比,不同射流角度下背压均有不同程度的回升,滞止点上移。这是因为基础工况下模型上方气流速度高于模型底部的气流速度,相同的射流对二者的作用效果不同,对于底部剪切层偏转的影响效果更大,因此施加射流后,尾迹区内下部涡结构相比于上部涡结构增强,占据了主导地位,因此背压回升,且滞止点上移。其次,对比不同角度下的背压分布, $\theta=45^\circ$ 时的背压回升程度最高,背部 $C_p$ 值从无射流基础工况的0.143降低到了0.106。而 $\theta=60^\circ$ 时背压分布与 $\theta=0^\circ$ 和 $\theta=45^\circ$ 时有明显区别,射流槽内侧出现低压区,而在两个不同的射流交汇的地方,出现了带状的高压区,这是由于射流角度过大,

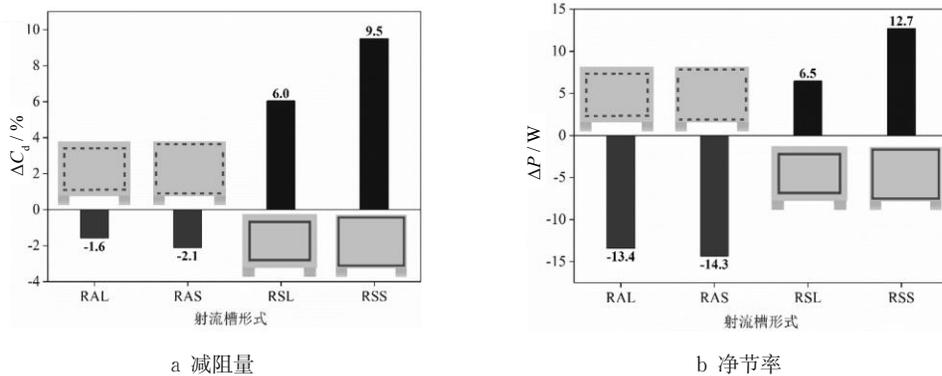


图9 4种射流槽布置形式

Fig.9 Drag reduction and net saved energy of four jet groove arrangements

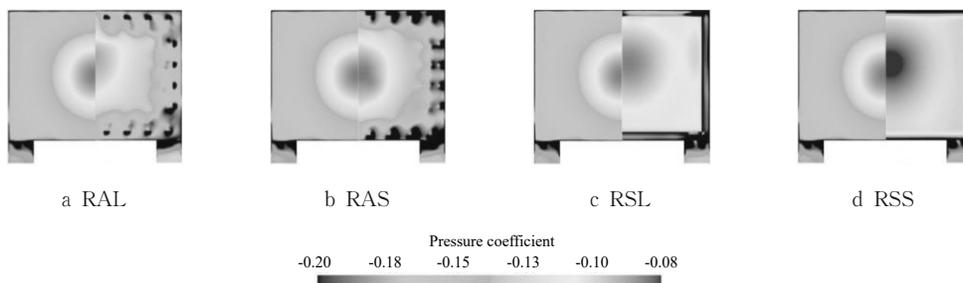


图10 4种射流槽布置形式的背压分布对比(每幅图左右侧分别为无、有射流工况)

Fig.10 Comparison of back pressure distribution of four jet groove arrangements

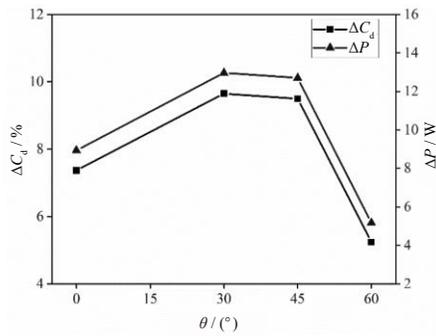


图 11 静止车轮 Ahmed 模型在不同射流角度下的减阻量和净节率

Fig.11 Drag reduction and net saved energy of SW at different jet angles

所引起的二次涡所导致的。

### 3.3.3 中截面速度场和流线图对比分析

图 13 展示了上述工况不同射流角度的中截面流向速度和流线分布,并和无射流基础工况进行比较。与基础工况相比,不同射流角度下,剪切层都向内偏转,尾迹宽度减小,回流区长度增大,尾涡涡核

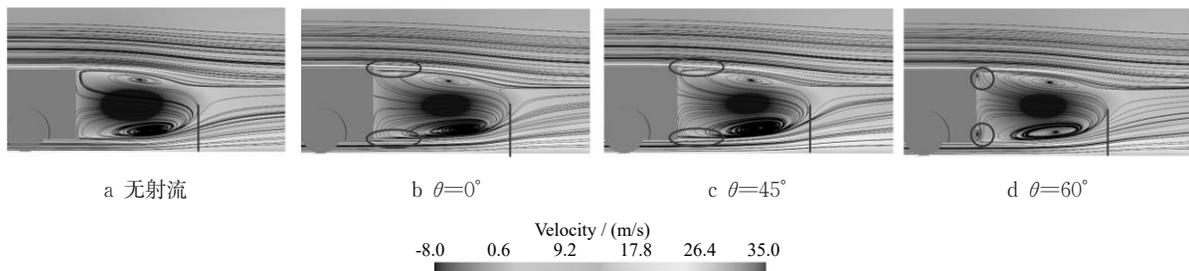


图 13 静止车轮方背 Ahmed 模型在不同射流角度下的中截面速度场和流线分布

Fig.13 Velocity field and streamline distribution in middle section of SW at different jet angles

### 3.4 动量系数对减阻效果的影响

在射流槽布置形式及射流角度研究的基础上,选取射流槽为距离边缘较近连续射流槽且射流角度  $\theta=45^\circ$  进行动量系数的影响研究。

#### 3.4.1 减阻量和净节率对比分析

图 14 展示了针对三种模型,采用不同  $C_\mu$  对减阻量和净节率的影响。随着  $C_\mu$  的增加,各模型的减阻量均随之单调递增,但净节率出现了先增后减的现象,最佳工况都出现在  $C_\mu=3\%$  时。整体来看,相较于 Ahmed 模型,车轮不会影响不同工况射流的变化规律,但会大幅地降低减阻量。增设静止车轮后,减阻量和净节率较之前有大幅下降,如最佳的工况 ( $C_\mu=3\%$ ) 的减阻量从 16.2% (Ahmed) 降至 9.5% (SW),净节率从 16.1 W 降至 12.7 W。车轮旋转后,相比于静止车轮,减阻量从 9.5% 降至 8.8%,净

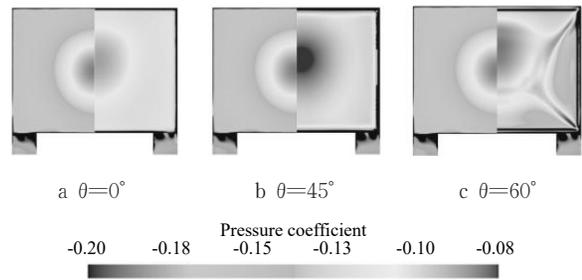


图 12 静止车轮方背 Ahmed 模型在不同射流角度下的背压分布

Fig.12 Back pressure distribution of SW at different jet angles

位置远离背部,导致了图中的背压回升。 $\theta=45^\circ$  时的工况相比于  $\theta=0^\circ$  时的工况,射流对剪切层向内偏转的能力更强,影响更为充分和有效; $\theta=60^\circ$  时,由于角度过大,已经出现了二次涡结构(见图 13d 的模型背部表面上部和下部位置),使背压下降严重(导致图 13c 中的背压分布),对剪切层的影响效果相比于  $\theta=45^\circ$  的工况也更差。综上所述, $\theta=30^\circ\sim 45^\circ$  为比较合适的角度。

节率从 12.7 W 降至 11.4 W。

#### 3.4.2 背压分布对比分析

图 15 展示了 RW 模型在射流角度为  $\theta=45^\circ$  时,不同动量系数下的背部压力分布,与无射流基础工况进行相比,施加射流后背部压力均有所回升,滞止点均上移。 $C_\mu=7\%$  时,和  $C_\mu=3\%$  时相比,其背压回升程度更大,背部  $C_d$  值从无射流基础工况的 0.143 降低到了 0.108。

#### 3.4.3 中截面速度场和流线图对比分析

图 16 展示了使用 RW 模型及射流角度为  $\theta=45^\circ$  时,不同动量系数下的模型尾部的中截面流向速度和流线图分布。与无射流基础工况相比,施加射流后,剪切层均向内偏转,尾迹宽度减小,回流区长度增大,尾涡涡核位置远离背部,导致了图 15 中的背压回升。当  $C_\mu$  从 0 (无射流工况) 增大至 3%,再继续

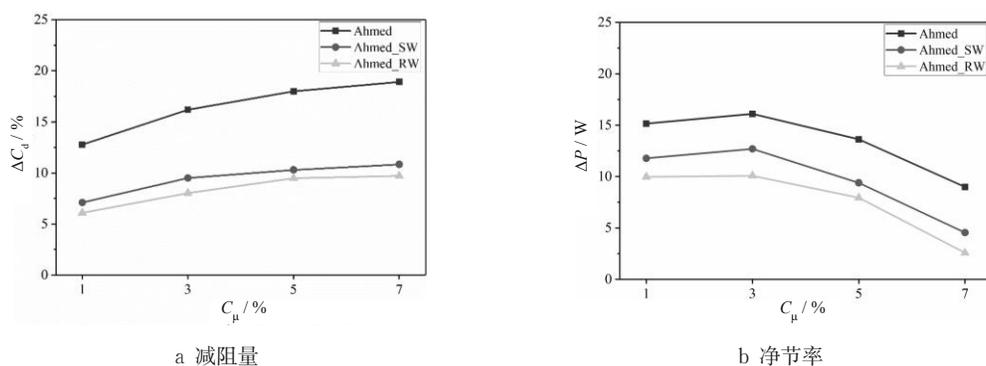


图14 不同动量系数  $C_\mu$  对3种方背Ahmed模型减阻量和净节率的影响

Fig.14 Effect of different  $C_\mu$  values on drag reduction and net saved energy of three square-back Ahmed models

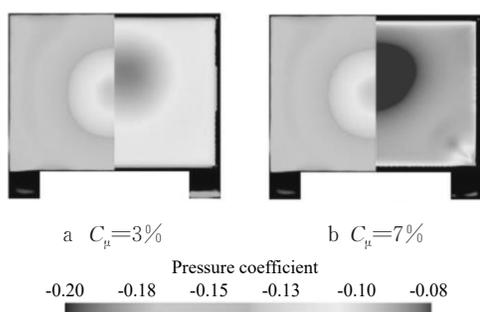


图15 旋转车轮方背Ahmed模型在不同动量系数  $C_\mu$  下的背部压力分布

Fig.15 Back pressure distribution of rotating wheel square-back Ahmed model at different momentum coefficient  $C_\mu$  values

增大至7%过程中,整个过程中背部阻力值单调递减,是因为随着动量系数的增大,在尾迹区域内的涡结构不断得到加强,回流区在垂向被不断压缩,在长度方向上延长,涡核位置也逐渐远离背部,并且强度也逐渐下降,使背压回升,阻力降低。而  $C_\mu = 3\%$  时,净节率最高,如果再继续增大动量系数,虽然可以继续增强减阻效果,但这种减阻效果增强所带来的节能效果,已经不能抵消加大射流强度所需增加的能耗增加,导致净节率开始下降。因此,动量系数不是越大越好,应选取一个适中的,净节率较高的动量系数值,如3%左右。

## 4 结论

本文采用基于雷诺平均的数值模拟方法,针对1/2缩比的Ahmed,SW,RW模型,通过在模型背部施加定常射流进行气动减阻研究,雷诺数为  $1 \times 10^6$ 。首先对比了无射流基础工况下,有无车轮及车轮旋

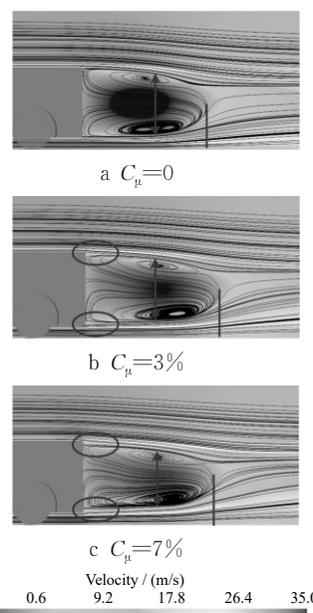


图16 旋转车轮方背Ahmed模型在射流角度  $\theta = 45^\circ$  时的中截面速度场

Fig.16 Middle section velocity field of Ahmed model of rotating wheel square back at a jet angle  $\theta$  of  $45^\circ$

转对方背Ahmed模型的气动特性影响;重点探究了考虑有车轮影响时射流槽布置形式、射流角度和动量系数对气动阻力的影响规律。主要结论如下:

(1) 车轮不会影响不同工况射流的变化规律,但会大幅地降低减阻量,尤其是旋转车轮。因此,在研究主动射流减阻问题时应当考虑车轮对减阻效果的影响。

(2) 射流槽布置形式是影响背部射流效果的重要因素。连续射流槽相比于离散射流槽可以更有效地稳定、偏转剪切层,同时避免在背部诱导出二次涡;且射流槽距离模型边缘越近,减阻效果越好。

(3) 射流角度若小于  $30^\circ$ ,不能充分地稳定、偏转剪切层,若大于  $60^\circ$ ,则会在背部诱导出二次涡,因

此,射流角度应适中,如 $30^{\circ}\sim 45^{\circ}$ ,减阻效果较好。

(4)增大动量系数,减阻量持续增加,但净节率将先增后降,峰值出现在 $C_{\mu}=3\%$ 附近。由于主动射流需要能量消耗,因此设计时不以追求最大减阻量为单一目标, $C_{\mu}$ 应选取一个适中、净节率高的值。

(5)最终得到有车轮方背 Ahmed 汽车模型背部射流的最佳工况为:采用连续射流槽(边缘距离 2 mm),射流角度为 $45^{\circ}$ ,动量系数为 $3\%$ 时,减阻量可达 $9.5\%$ ,对应净节率为 $12.7\text{ W}$ 。

### 参考文献:

- [1] 李文火. 沟槽型非光滑车表汽车气动减阻特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.  
LI Wenhao. Study of aerodynamic drag reduction feature on automobile with non-smooth groove surface [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [2] HAEICHEON C, JUNGIL L, HYUNGMIN P. Aerodynamics of heavy vehicles[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2014, 46: 441. DOI: 10.1146/annurev-fluid-011212-140616.
- [3] VOLPE R, DEVINANT P, KOURTA A. Experimental characterization of the unsteady natural wake of the full-scale square back Ahmed body: Flow bi-stability and spectral analysis [J]. Experiments in Fluids, 2015, 56(5): 1. DOI: 10.1007/s00348-015-1972-0.
- [4] AHMED S R, RAMM G, FALTIN G. Some salient features of the time-averaged ground vehicle wake[J]. SAE Technical Paper 840300, 1984, <https://doi.org/10.4271/840300>.
- [5] MINGUEZ M, PASQUETTI R, SERRE E. High-order large-eddy simulation of flow over the "Ahmed body" car model [J]. Physics of Fluids, 2008, 20(9): 123. DOI: 10.1063/1.2952595.
- [6] KHALIGHI B, KUO-HUEY C, IACCARINO G. Unsteady aerodynamic flow investigation around a simplified square-back road vehicle with drag reduction devices [J]. Journal of Fluids Engineering, 2012, 134(6). DOI: 10.1115/1.4006643.
- [7] KHALIGHI B, BALKANYI S R, BERNAL L P. Experimental investigation of aerodynamic flow over a bluff body in ground proximity with drag reduction devices [J]. Int J of Aerodynamics, 2013, 3(4): 217. DOI: 10.1504/IJAD.2013.054421.
- [8] 杨志刚, 范亚军, 夏超, 等. 基于双稳态尾迹的方背 Ahmed 模型减阻[J]. 吉林大学学报(工学版), 2020, 50(5): 1635.  
YANG Zhigang, FAN Yajun, XIA Chao, *et al.* Drag reduction of a square-back Ahmed model based on bi-stable wake [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2020, 50(5): 1635. DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb20190401.
- [9] ROUMEAS M, GILLIERON P, KOURTA A. Analysis and control of the near-wake flow over a square-back geometry [J]. Computers and Fluids, 2009, 38(1): 60. DOI: 10.1016/j.compfluid.2008.01.009.
- [10] BARROS D, BOREE J, NOACK B R, *et al.* Bluff body drag manipulation using pulsed jets and Coanda effect [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2016, 805: 422. DOI: 10.1017/jfm.2016.508.
- [11] SCHMIDT H J, WOSZIDLO R, NAYERI C N, *et al.* Drag reduction on a rectangular bluff body with base flaps and fluidic oscillators [J]. Experiments in Fluids, 2015, 56(7). DOI: 10.1007/s00348-015-2018-3.
- [12] WANG Y F, SICOT C, Borée J, *et al.* Experimental study of wheel-vehicle aerodynamic interactions [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2020, 198: 104062. DOI: 10.1016/j.jweia.2019.104062.
- [13] ZHANG B F, LIU K, ZHOU Y, *et al.* Active drag reduction of a high-drag Ahmed body based on steady blowing [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2018, 856: 351. DOI: 10.1017/jfm.2018.703.
- [14] SHIH T H, LIOU W W, SHABBIR A, *et al.* A new  $k-\epsilon$  eddy viscosity model for high Reynolds number turbulent flows [J]. Computers and Fluids, 1995, 24(3): 227. DOI: 10.1016/0045-7930(94)00032-T.
- [15] 周华, 杨志刚, 朱晖. 基于整车风洞试验的 MIRA 车型数值计算 [J]. 吉林大学学报(工学版), 2019, 49(4): 1043. DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb20180226.  
ZHOU Hua, YANG Zhigang, ZHU Hui. Aerodynamic calculation of MIRA model correlated with wind tunnel test [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2019, 49(4): 1043. DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb20180226.
- [16] GRANDEMANGE M, GOHLKE M, CADOT O. Turbulent wake past a three-dimensional blunt body Part 1: Global modes and bi-stability [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2013, 722: 51. DOI: 10.1017/jfm.2013.83.