

基于定常射流的快背式 MIRA 车型主动气动减阻

陈羽^{1,2}, 汪志军^{1,2}, 王珂玮^{1,2}, 杨志刚^{1,2,3}

(1. 同济大学汽车学院, 上海 201804; 2. 上海市地面交通工具空气动力学与热环境模拟重点实验室, 上海 201804;

3. 北京民用飞机技术研究中心, 北京 102211)

摘要: 低风阻对燃油汽车节能减排和增加电动汽车续航里程具有重要意义。近年来, 主动射流技术已用于汽车减阻研究中, 但多是针对方背体等高风险车体模型开展。本文以 MIRA 快背式车型为对象, 研究车辆背部定常射流的布置位置、射流动量系数和射流角度对减阻量和净节率的影响规律, 并给出了流场分析。结果表明: 快背式车型垂直尾部射流(J3、J4、J5)是有效的节能措施, 低动量系数具有较好的净节率, 气动减阻量和净节率随射流角度变化存在极大值; 最大减阻主动射流工况是对垂直尾部(J3、J4、J5)射流槽进行射流、动量系数 1%、射流角度为 45° 时, 其减阻量为 2%, 对应净节率 129.7 W。

关键词: MIRA 快背式车型; 定常射流; 气动减阻; 主动控制
中图分类号: U461.1 **文献标志码:** A

Active Drag Reduction of Fastback MIRA Model Based on Steady Blowing

CHEN Yu^{1,2}, WANG Zhijun^{1,2}, WANG Kewei^{1,2}, YANG Zhigang^{1,2,3}

(1. School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Shanghai Key Lab of Vehicle Aerodynamics and Vehicle Thermal Management System, Shanghai 201804, China; 3. Beijing Aeronautical Science & Technology Research Institute, Beijing 102211, China)

Abstract: Low aerodynamic drag are of great significance for energy conservation and emission reduction of fuel vehicles, as well as increasing the range of electric vehicles. In recent years, the active jet technology is mostly applied to high aerodynamic vehicle models such as square back model, but its drag reduction and mechanism on low drag vehicles are not clear. In this paper, the effects of steady jet position, jet momentum coefficient and jet angle on drag reduction and net saving are studied, and the flow field analysis is given. The results show that the vertical rear jet (J3, J4, J5) of the

fast back vehicle is an effective energy-saving measure, the low momentum coefficient has a good net saving rate, and the aerodynamic drag reduction and net saving rate have a maximum value with the change of jet angle. The best working condition to get the back jet in the end is: J3, J4 and J5 jet grooves arranged at the tail of the model are used for jet, the momentum coefficient is 1% and the jet angle is 45°, the aerodynamic drag was reduced 2% and the net saved energy can reach 9.5% and 129.7W, respectively.

Keywords: fastback MIRA model; steady blowing; drag reduction; active control

为了实现中国 2030 年碳达峰、2060 年碳中和目标, 汽车生产商必须重点关注车辆节能减排技术, 以实现燃油车减排和新能源车电耗降低^[1]。研究表明, 汽车的气动阻力每减少 10%, 燃油消耗可减少 5%^[2]。我国是乘用车生产和消费大国, 降低乘用车气动阻力对实现上述目标具有重要意义。

射流技术通过将射流注入到外部流场中, 改变流场拓扑结构从而实现气动减阻。主动射流有定常射流、非定常射流等形式, 不同于传统的船尾^[3]、背部空腔等^[4]控制方法, 主动射流无需改变车辆外形, 对汽车行驶工况的适应性强, 以及可实现闭环控制等优点, 近年来受到研发机构的重视。Geropp^[5]运用 Coanda 效应对汽车模型进行喷气控制, 控制方法将尾部静压提高 50%, 有效减阻 10%。Brunn^[6]分别对 Ahmed 类车体 25° 和 35° 后倾角模型斜背部上缘布置射流, 究射流对尾迹区的影响。Bruneau^[7]对二维方背钝头体模型进行射流控制, 发现射流速度为来流 0.6 倍时效果最好。Roumeas^[8]在方背车体模型背部边缘施加定常射流控制, 射流能够有效减小尾

收稿日期: 2023-12-12

基金项目: 新能源汽车及动力系统国家工程研究中心资助项目; 国家重点研发计划(2022YFE0208000); 中央高校基本科研业务费专项资金; 上海市地面交通工具空气动力学与热环境模拟重点实验室资助项目(23DZ2229029)

第一作者: 陈羽(1986—), 男, 工程师, 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: 08_yu_chen@tongji.edu.cn

迹区截面积、尾流中压力损失以及使背部压力回升,并确定了射流的最优控制参数是射流速度为来流速度的0.5倍。Minelli^[9]还在卡车头部边缘安装合成射流器成功抑制了绕过卡车头部的分离涡。目前量产乘用车与MIRA快背式车型的外形类似,但其流场结构与类车体和方背式车体有很大差异^[10-11]。张英朝^[12]采用格子-玻尔兹曼计算方法,对快背式车型在发动机罩后缘、车身侧面等位置主动射流进行了减阻研究。但主动射流减阻量和净节率之间还存在矛盾,仍需探索更加优化的控制方法。

为此,本文针对快背式MIRA车型,采用基于雷诺平均的数值计算方法,研究在其斜背和垂直尾部施加主动射流的减阻效果;重点分析了主动射流布置位置、射流动量系数和射流角度对快背式车型减阻的影响规律。

1 模型参数及主动射流方法

1.1 快背式MIRA模型

本文选用快背式MIRA模型的参数和车型外观如图1所示:车身高 $L=4\ 165\text{ mm}$,宽 $W=1\ 625\text{ mm}$,高 $H=1\ 421\text{ mm}$;车轴距为 $2\ 540\text{ mm}$,车轮距为 $1\ 270\text{ mm}$,轮胎宽为 180 mm ,轮胎为简化固定车轮。为模拟车轮在汽车行驶过程中变形产生的变化导致其离地间隙变化,对车轮进行凸台接地处理。

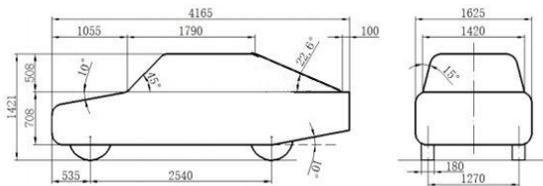


图1 快背式MIRA模型

Fig. 1 Fastback MIRA model

1.2 定常射流参数设置

研究表明,连续式射流槽对车辆气动减阻和节能有更好的效率^[13]。本文采用连续射流槽,距离背部和尾部的边缘距离为 8 mm ,射流槽宽度均为 8 mm ,如图2所示。对于快背式MIRA模型,斜背及垂直背部的压差阻力有重要贡献^[10],采用射流方法来提高该区域的背压。因此,在车斜背部和垂直尾部分别布置了五处射流槽,将之分别命名为J1、J2、J3、J4、J5。其中,斜背部顶端射流槽为J1,斜背部左右两侧呈对称射流槽为J2,垂直尾部顶端射流槽为J3,尾部左右两侧呈对称射流槽为J4,尾部底部射流

槽为J5。主动射流需要额外能量输入,动量系数 C_μ 表征了输入能量与来流能量的比值,其具体公式定义如下:

$$C_\mu = \frac{2A_{nozzle}U_{jet}^2}{AU_\infty^2} \quad (1)$$

式中: A 为MIRA模型在来流方向上的投影面积, m^2 ; $A_{nozzles}$ 为开启射流的射流槽面积之和, m^2 ; U_{jet} 为射流速度, m/s ; U_∞ 为来流速度, m/s 。

除射流动量系数外,射流角度也会改变汽车尾迹结构和背压分布^[14]。因此,将MIRA模型斜背、垂直尾部的射流角度作为控制变量。角度具体为:当射流垂直于模型表面时,将射流角度定义为 0° ;当射流向模型斜背部、垂直尾部的中心偏移时,此时的偏移量射流角度 θ 定义为正值,反之为负值。

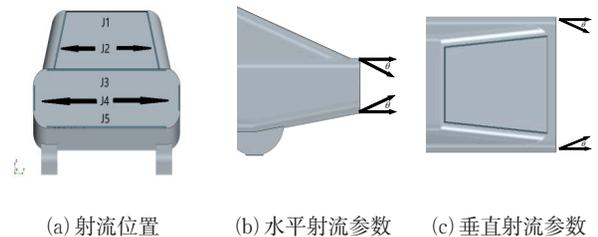


图2 射流布置形式

Fig. 2 Jet arrangements

2 研究方法

2.1 数值计算方法

选用商业计算流体力学软件STAR-CCM+进行求解不可压缩N-S方程,湍流模型使用可实现的 $k-\epsilon$ 模型,其对可能导致的负正应力,进行了数学约束,涡粘系数计算公式中,系数不应是常数而应该是与旋转应变率有关的量,对于分离流动计算有较高的精度^[15],近壁使用双层全 $y+$ 壁面函数求解近壁面问题。求解器是基于不可压缩的分离式求解器,压力速度梯度采用SIMPLE算法,对流项、扩散项采用二阶迎风格式。计算来流速度为风速为 120 km/h ,以车高作为参考长度,雷诺数为 3.16×10^6 。射流槽在射流的工况下设置为速度入口,并根据动量系数赋予不同的速度,在无工况的情况下设置为无滑移壁面。

计算域采用的是矩形半自由空间,如图3所示。计算域的总体尺寸设置为 $11L \times 12W \times 6H$,汽车模型的头部到入口的距离为 $3L$,模型尾部与出口之间

的距离为 $7L$ 。计算域的设置如下:计算域入口为速度入口,计算域出口为压力出口,车体和地面采用无滑移壁面边界条件,其他计算域边界为对称边界条件。

在车身周围的加密区分为无侧风和有侧风两种情况,在无侧风下,车身周围的加密区大小为: $4L \times 2W \times 1.5H$;有侧风下车身周围的加密区大小为: $4L \times 7.5W \times 1.5H$,车身周围的网格分布如图3所示。

为了精确的模拟车体表面流动,在车体周围生成5层边界层网格,第一层边界层厚度为 0.8 mm 。车体表面网格的 y^+ 在 $30 \sim 200$ 范围内,满足双层全 y^+ 壁面函数的要求。

2.2 气动减阻评价方法

气动阻力系数 C_d 是用于衡量物体在空气中阻力的无量纲系数,其定义如下:

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

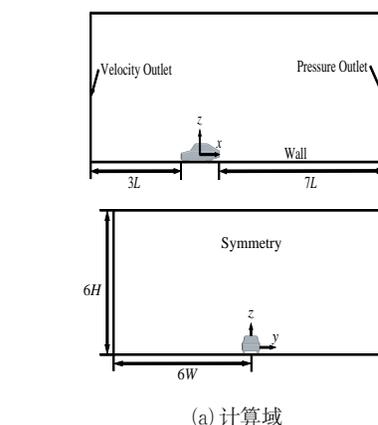
式中: ρ 为来流的空气密度,取 $1.225\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$; U_∞ 为来流速度; A 为参考面积,试验中取 $A=0.181\text{ m}^2$; F_d 为气动阻力。

减阻量 ΔC_d 则是用来表示在射流槽进入射流工况进行主动减阻之后,相对于无射流的情况下,阻力系数减小的程度。其定义如下:

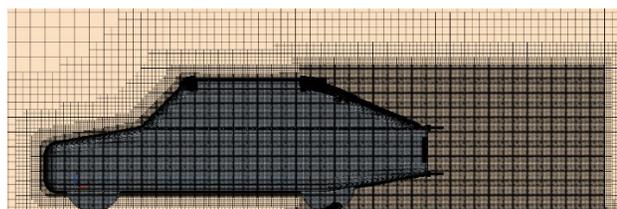
$$\Delta C_d = \frac{C_{d0} - C_{d1}}{C_{d0}} \times 100\% \quad (3)$$

式中: C_{d0} 为无射流工况的气动阻力系数; C_{d1} 为开启射流工况的气动阻力系数。

在主动射流的时候需要额外的能量输入,采用净节约功率 ΔP (后文中简称净节率)来表示主动射流减阻的实际收益,也就是减阻带来的收益与射流能量的差值,其定如下:



(a) 计算域



(b) 计算网格

图3 计算域和计算网格

Fig. 3 Computational domain and mesh

$$\Delta P = 0.5\rho U_\infty^3 A(C_{d0} - C_{d1}) - 0.5\rho_{\text{jet}} U_{\text{jet}}^3 A_{\text{nozzles}} \quad (4)$$

式中: ρ_{jet} 为射流空气密度, U_{jet}^3 为射流速度, A_{nozzles} 为射流口面积。

2.3 风洞试验及网格无关性验证

验证试验在上海地面交通工具风洞中心气动声学整车风洞进行,该风洞为具有3/4开口试验段的回流式风洞,如图4所示。该风洞驻室长 22 m 、宽 17 m 、高 12 m ;试验段喷口宽 6.5 m 、高 4.25 m 、喷口面积 27 m^2 ,MIRA模型的风洞试验阻塞比为 6.9% ;试验段长度 15 m ,与汽车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 ,试验段静压梯度小于 $0.001/\text{m}$ 。

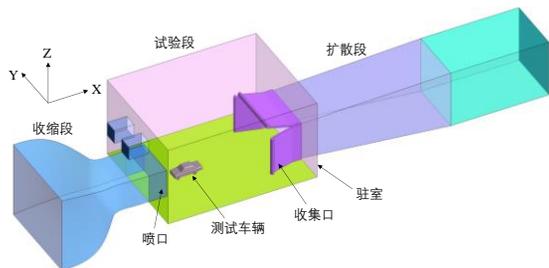


图4 风洞试验布置

Fig. 4 Wind tunnel test setup

针对MIRA模型,设置了4套尺寸不同的网格GRID1—GRID4,以验证模型的网格无关性。全局

目标面网格尺寸分别为 160 mm 、 240 mm 、 340 mm 、 480 mm ,在射流槽处选用网格尺寸为 2 mm ;射流槽

后部单独进行了网格加密,体网格尺寸为2 mm。体网格采用了切割体网格,以保证核心区域的网格为六面体;边界层网格第一层的厚度为0.8 mm,增长率为1.2,共5层,总厚度为6 mm,计算得到车身表面平均 y^+ 在30左右, x^+ 、 z^+ 随网格加密,范围在200~600之间,网格总数在1 042万到9 277万之间。

表1展示了MIRA模型在不同网格设置下的气动阻力系数 C_d 值。可以看出,数值计算结果均较风洞实验值偏大,偏差范围在1.2%~5.6%之间。当网格数量增加到3 117万时,时间平均气动阻力系数维持不变,为0.254,表明该计算方法对于MIRA模型的气动阻力预测是可靠的。因此,考虑计算精度和效率后,采用GRID2的网格布置方案进行后续计算和分析。

3 气动减阻分析

3.1 背部射流槽位置对减阻的影响

针对五种射流槽布置形式,在射流动量系数 $C_\mu=1\%$ 、射流角度 $\theta=0^\circ$ 的情况下,对比其气动减阻的效果。

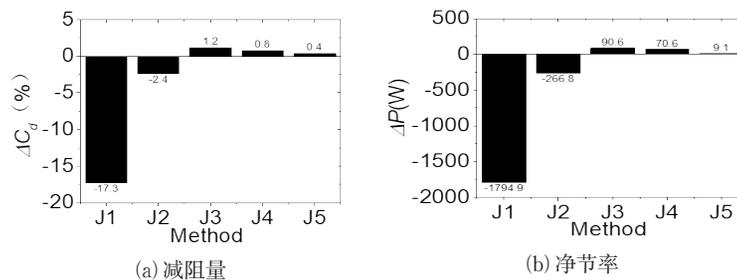


图5 射流布置形式减阻影响

Fig.5 Drag reduction and net saved energy on jet arrangement

3.1.2 背压分布对比分析

图6给出了5种不同位置布置射流槽下MIRA模型的背压分布。在斜背区域,与基础工况图6(a)对比可知,J1使得整个斜背上负压增大,这是由于MIRA快背车型自身流线型较好,分离区小^[16],斜背顶部的J1射流使得气流在斜背处产生大尺度的流动分离,使得背压降低。J2射流导致斜背两侧负压区增大。J3、J4、J5射流对斜背区域影响很小,其背压分布与基础工况相同。

图7给出不同位置布置射流槽下MIRA模型垂直尾部水平中截面静压分布曲线。结合图6可知,

表1 MIRA模型不同网格设置及 C_d 值

Table 1 Comparison of numerical and experiment results

序号	网格/万	y^+	x^+	z^+	C_d	偏差/%
风洞实验	—	—	—	—	0.251	—
GRID1	9 277	30	200	200	0.254	1.2
GRID2	3 117	30	300	300	0.254	1.2
GRID3	1 528	30	400	400	0.259	3.2
GRID4	1 042	30	600	600	0.265	5.6

3.1.1 减阻量和净节律

图5(a)和(b)分别展示了不同射流槽工况下的减阻量和净节率。对比分析可知,MIRA模型垂直尾部射流开启时,其具有气动减阻的效果。当J3射流工况时,减阻效果最好,减阻量可达1.2%,净节率可达90.6W;J4次之,减阻量为0.8%,净节率为70.6W;J5减阻效果相对J3、J4差,减阻量为0.4%,净节率为9.1W。

在MIRA模型斜背部的J1、J2射流开启时,气动阻力系数和净节率均增大。其中:J1的效果最差,增阻量达到17.3%,净节率为-1794.9W;J2射流开启时,增阻量为2.4%,净节率为-266.8W。由上可知,对于MIRA模型,定常射流应布置在垂直尾部,使其具有减阻效果。

在垂直尾部区域,与基础工况对比,J1射流使得垂直尾部静压整体下降;J2射流开启时,表现为单一的中心垂直背部高压分布,在 $-0.25\text{ m} < y < 0.25\text{ m}$ 的中间区域静压系数有明显回升,垂直尾部 $y=0$ 中心位置静压系数由-0.062提高到-0.032,但其两侧静压系数较基础工况低;J3、J4、J5射流下,垂直尾部静压分布规律与基础工况一致,其中J3射流使得垂直尾部静压系数整体提高了0.005,J4和J5射流在 $-0.25\text{ m} < y < 0.25\text{ m}$ 的中间区域静压系数分布与基础工况接近,在垂直尾部两侧静压有所回升。

综上,背部J1—J5射流会改变斜背、垂直尾部的

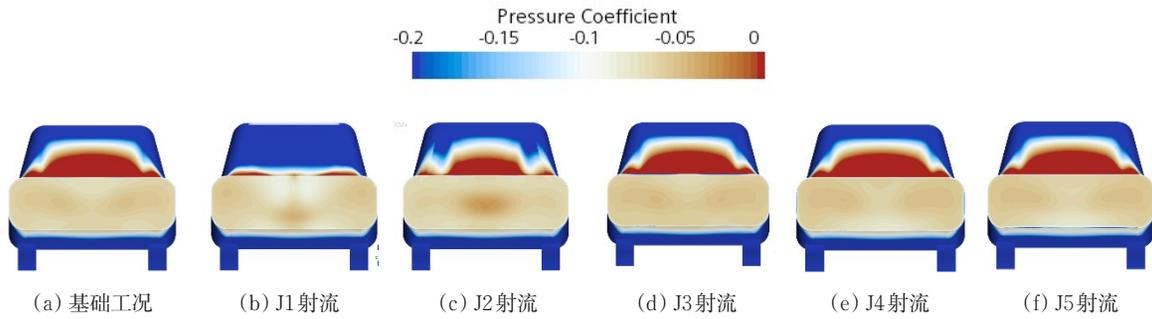


图 6 不同射流布置形式下背压分布

Fig.6 Back pressure distribution at different jet locations

压力,需综合考虑其影响,J3、J4、J5射流提升了垂直尾部的静压系数,是较好的主动射流减阻布置区域。

3.2 动量系数对减阻效果影响

在以上研究基础上,采用J3—J5主动射流开启,射流角度 $\theta = 0^\circ$ 的情况下,研究动量系数 C_μ 变化对MIRA模型减阻效果的影响。

3.2.1 减阻量和净节律

图8(a)和(b)分别展示了动量系数 $C_\mu = 1\%$ 、 3% 、 5% 、 7% 的减阻量和净节率。由图可知,随着动量系数在3%以下时,减阻量均为1.2%,随着动量系数继续增加,减阻量由正转负;净节率出现了先增大后减小的现象,最佳净节率工况出现在动量系数

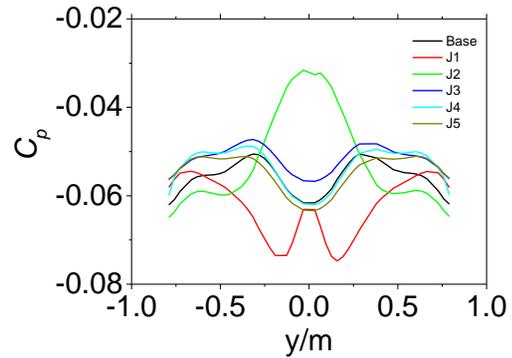
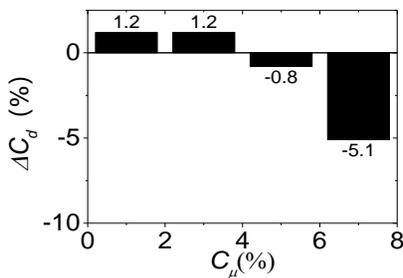


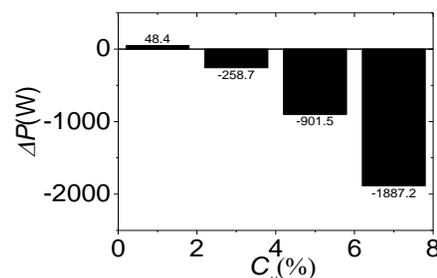
图 7 不同射流布置形式垂直尾部静压系数曲线

Fig.7 Pressure coefficient curve on vertical tail at different jet locations

为1%时,减阻量为1.2%,净节率为48.4 W。



(a) 减阻量



(b) 净节率

图 8 不同动量系数对减阻效果影响

Fig.8 Effects of C_μ on drag reduction and net saved energy

3.2.2 背压分布对比分析

图9给了不同动量系数下MIRA的背压分布,J3—J5射流开启时,斜背静压与基础工况的相同。在垂直背部存在左右对称最高压力点,随动量系数增加,两个最高压力点不断向车体的两侧移动。射流动量系数 $C_\mu = 1\%$ 、 3% 的工况整体背部压力有所回升,基础工况垂直尾部气动阻力系数0.028, $C_\mu = 1\%$ 、 3% 时分别减小到0.025和0.026。随着动量系

数增大,在 $C_\mu = 5\%$ 时J3射流槽内侧明显压力降低,在 $C_\mu = 7\%$ 整个垂直尾部静压系数下降,气动阻力系数 $C_\mu = 5\%$ 、 7% 时增大到0.030和0.041。由于高动量系数射流会在射流口附近产生负压区,MIRA快背式车型垂直尾部面积较方背体车型小,其导致的负压,在积分的垂直尾部气动阻力系数中占有较大比例。综上,对于MIRA快背式车型,低动量系数具有较好的气动减阻效果。

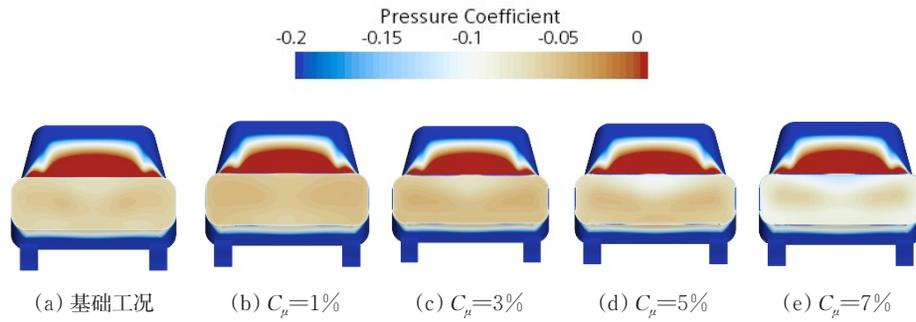


图9 不同动量系数时背压分布

Fig.9 Effects of C_μ on drag reduction and net saved energy

图 10 给出不同动量系数下垂直尾部静压分布, 可知动量系数小于 5% 时, 垂直尾部静压系数有不同程度提升, 其中动量系数为 1%、3% 时, 垂直尾部静压整体升高, 动量系数为 5% 时, 在 $-0.75\text{m} < y < -0.5\text{m}$ 和 $0.5\text{m} < y < 0.75\text{m}$ 范围内静压升高。随动量系数增大, 尾部流动结构基本一致。

3.3 射流角度对减阻效果影响

在以上研究基础上, 采用 J3—J5 主动射流开启, 动量系数 $C_\mu = 1\%$ 时, 研究射流角度 $\theta = 0^\circ$ 变化对 MIRA 模型减阻效果的影响。

3.3.1 减阻量和净节律

图 11(a) 和 (b) 分别展示了 $\theta = 0^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ 和 60° 工况的减阻量和净节率。由图可知, 在射流角度为 $0^\circ \sim 60^\circ$ 之间时, 减阻量和净节率均为正值。当射流

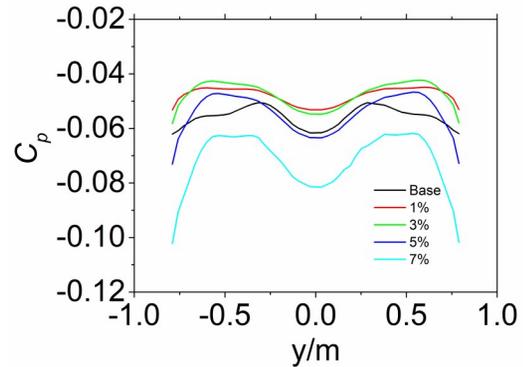


图 10 动量系数对垂直尾部静压系数影响

Fig.10 Effects of C_μ on pressure coefficient curve on vertical tail

角度 $\theta = 45^\circ$ 时, 减阻效果最好, 减阻量可达 2%, 净节率可达 129.7 W。

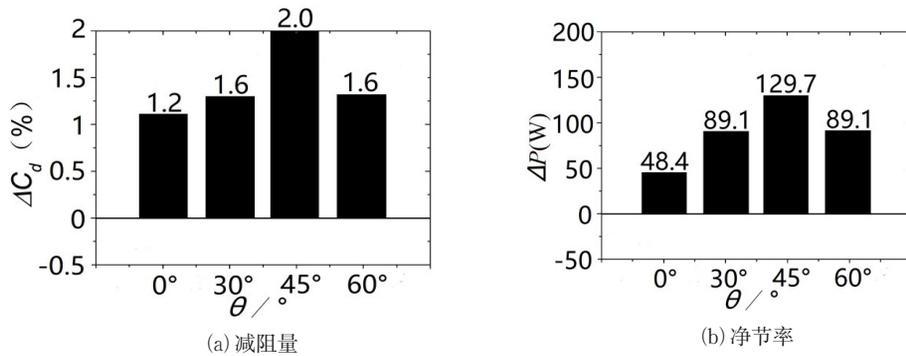


图 11 不同射流角度对减阻效果的影响

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

3.3.2 背压分布与流场对比分析

图 12 给出了不同射流角度下 MIRA 模型的背压分布。由图可以发现, 当 J3—J5 射流开启时, 斜背静压与基础工况的相同。与基础工况图 12(a) 相比, 不同射流角度下垂直尾部的背压均有不同程度提高。

当射流角度为 $0^\circ, 30^\circ$ 和 45° 时, 垂直背部左右对称的两个最高压力点, 均向车体的两侧移动, 这是因为射流使得尾部剪切层偏转, MIRA 模型尾部形成的两个反对称涡结构向车体两侧偏移导致; 当射流角度为 60° 时, 垂直尾部的背压分布与基础工况有较大差异, 最高压力区表现为复杂的交叉状分布。

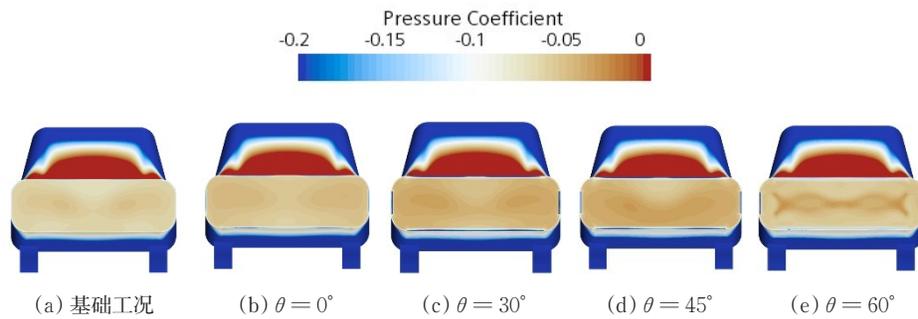


图12 不同射流角度下背压分布

Fig.12 Back pressure distribution at different jet angles

图13给出了基础工况和射流角度 $\theta = 45^\circ$ 、 60° 下对称中截面流线图, $\theta = 0^\circ$ 和 30° 工况与 $\theta = 45^\circ$ 近似。

与基础工况相比,在射流开启时剪切层均向内偏转,尾迹宽度减小,尾涡的涡核远离垂直尾部,使得垂直尾部的背压提升。

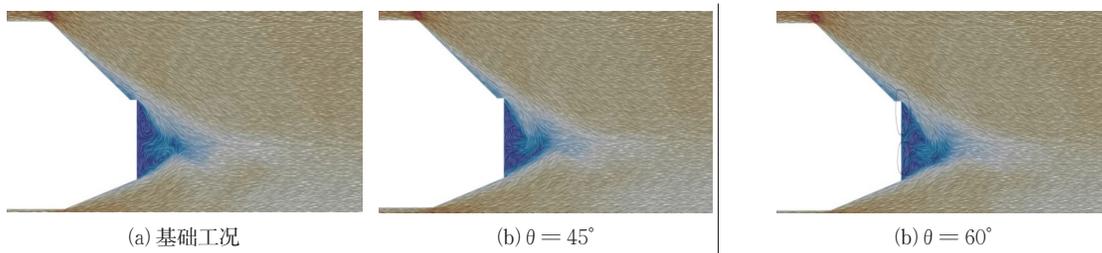


图13 不同射流角度下中截面流线图

Fig.13 Streamline in middle section at different jet angles

当 $\theta = 60^\circ$ 时,在垂直尾部近壁处出现了二次涡结构,在J3、J5射流槽内侧产生流动分离,射流槽内侧区域背压下降。综上,对于MIRA模型垂直尾部射流角度 $\theta = 45^\circ$ 时,是更好的气动减阻射流角度。

个主动射流,动量系数为1%,射流角度为 45° 时,减阻效果最好,减阻量为2%,对应净节率为129.7 W。

4 结论

本文采用求解雷诺平均方程的数值方法,以MIRA快背式车型为研究对象,研究了主动射流布置位置、动量系数和射流角度对气动减阻效果的影响规律,结论如下:

(1) 射流布置位置和射流角度是影响MIRA快背式车型的主要因素。在垂直尾部布置射流槽可以提升该区域的整体背压,射流角度在 45° 时,可以有效的偏转剪切层,同时避免大角度在垂直尾部产生的二次涡,具有较好的减阻效果。

(2) 低动量系数对快背式车型具有较好的减阻效果和净节率。MIRA快背式车型垂直尾部面积较小,高动量系数射流会在射流口附近产生负压区,在垂直尾部气动阻力系数中占有较大比例。

(3) 对于MIRA快背式车型,垂直尾部采用三

参考文献:

- [1] 全国汽车标准化技术委员会. 电动汽车能量消耗率和续驶里程试验方法: GB/T18386—2017[S]. 北京: 中国标准出版社,2017.
National Automotive Standardization Technical Committee. Test method for energy consumption rate and range of electric vehicles: GB/T18386—2017 [S]. Beijing: China Standards Publishing House, 2017.
- [2] 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 on the aerodynamic drag reduction characteristics of groove type non optical pulley gauges for automobiles[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [3] HAECHEON C, JUNGIL L, HYUNGMIN P. Aerodynamics of heavy vehicles[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2014, 46:441.
- [4] 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.
- [5] GEROPP D, ODENTHAL H J. Drag reduction of motor vehicles by active flow control using the Coanda effect [J]. Experiments in Fluids, 2000, 28(1): 74.
- [6] BRUNN A, WASSEN E, SPERBER D, *et al.* Active drag control for a generic car model [J]. Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design, 2007, 95: 247.
- [7] BRUNEAU C H, CREUSÉ E, DEPEYRAS D, *et al.* Coupling active and passive techniques to control the flow past the square back Ahmed body [J]. Computers and Fluids, 2010, 39(10): 1875.
- [8] ROUMEAS M, GILLIÉRON P, KOURTA A. Analyze and control of the near-wake flow over a square-back geometry [J]. Computers and Fluids, 2013, 38(1): 60.
- [9] MINELLI G, ADI HARTONO E, CHERNORAY V, *et al.* Validation of PANS and active flow control for a generic truck cabin [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2017, 171: 148.
- [10] 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.
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.
- [11] ZHANG Yingchao, ZHANG Jintao, WU Kaiguang, *et al.* Aerodynamic characteristics of mira fastback model in experiment and CFD [J]. International Journal of Automotive Technology, 2019, 20(4): 723.
- [12] 张英朝, 郑镇雨, 吴开广, 等. MIRA 快背式模型主动减阻研究 [J]. 汽车工程, 2020, 42(5): 588.
ZHANG Yingchao, ZHENG Zhenyu, WU Kaiguang, *et al.* Active drag reduction of MIRA fast-back model [J]. Automotive Engineering, 2020, 42(5): 588.
- [13] 杨志刚,任静,夏超,等. 基于定常射流的有车轮方背Ahmed 模型主动气动减阻 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2021, 49(S1): 39.
YANG Zhigang, REN Jing, XIA Chao, *et al.* Active drag reduction of a square-back Ahmed body with wheels based on steady blowing [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2021, 49(S1): 39.
- [14] LI Y, CUI W, JIA Q, *et al.* Explorative gradient method for active drag reduction of the fluidic pinball and slanted Ahmed body [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2022, 932: A7.
- [15] SHIH T H, LIOU W W, SHABBIR A, *et al.* A new $k-\epsilon$ eddy viscosity model for high Reynolds number turbulent flow-model development and validation [J]. Computers & Fluids, 1995, 24 (3): 227.
- [16] BISWAS K, GADEKAR G, CHALIPAT S. Development and prediction of vehicle drag coefficient using OpenFoam CFD tool [C] // Symposium on International Automotive Technology 2019. <https://doi.org/10.4271/2019-26-0235>.