

某微型电动车前轮区域主动射流气动减阻^①

陶悦^{1,2}, 夏超^{1,2,4}, 杨志刚^{1,2,3}

1. 同济大学汽车学院
2. 同济大学上海地面交通工具风洞中心
3. 北京民用飞机技术研究中心
4. 同济大学南昌汽车创新研究院

【摘要】 本文针对某微型电动车，利用数值模拟对其前轮区域进行了主动定常射流的减阻设计，探究了射流角度和动量系数对整车气动减阻的影响。研究表明：对前轮前部施加射流会产生阻滞作用，改变前轮及其轮腔附近的流场分布，减小前轮迎风面和轮腔后部的表面压力，从而降低气动阻力。减小射流角度，增大动量系数可以增强减阻效果，但过大的动量系数会降低净节率。当射流角度为-30°、动量系数为0.75%时，可达到最高减阻量37counts，在相同射流角度下，动量系数为0.5%时，可达到最大净节率527W，减阻量30counts，同时获得较好的减阻效果和节能性。本研究对未来电动汽车的主动气动减阻优化设计具有重要的参考意义。

【关键词】 电动车，主动气动减阻，定常射流，车轮

Drag Reduction by Active Jet for the Front Wheel Region of a Small Electric Vehicle

Tao Yue^{1,2}, Xia Chao^{1,2,4}, Yang Zhigang^{1,2,3}

1. School of Automotive Studies, Tongji University
2. Shanghai Automotive Wind Tunnel Center, Tongji University
3. Beijing Aeronautical Science & Technology Research Institute
4. Nanchang Automotive Institute of Intelligence & New Energy

Abstract: In this paper, the aerodynamic drag reduction design about active steady jet is carried out for the front wheel region of a small electric vehicle, based on numerical simulation. The effects of jet angle and momentum coefficient on the aerodynamic drag reduction of the whole vehicle are explored. The results show that: applying a jet to the front of the front wheel can produce a blocking effect and change the flow field near the front wheel and wheelhouse. Then the surface pressure on the windward side of the front wheel and the rear of the wheelhouse is decreased, leading to drag reduction; reducing the jet angle and increasing the momentum coefficient can enhance the drag reduction effect, but too large momentum coefficient will reduce the net saved energy; when the jet angle is -30° and the momentum coefficient is 0.75%, the highest drag reduction is 37 counts. The maximum net saved energy 527W can be achieved at the same jet angle with a momentum coefficient of 0.5%, obtaining both drag reduction and energy saving. This work has important reference significance for the optimal design of active aerodynamic drag reduction for future electric vehicles.

Key words: electric vehicle, active aerodynamic drag reduction, steady jet, wheels

引言

近年来，随着我国汽车行业对节能减排和环境保护的重视性不断提高，电动汽车得到了飞速的发展和普及，其动力性、经济性和安全性等依然是企业和消费者们关注的重点。汽车能耗主要受动力系统能量转化效率、道路阻力和气动阻力等的影响。研究表明，气动阻力与车速的平方成正比，对于电动汽车，在高速状态下的空气阻力可达到总行驶阻力的48%^[1]，在行驶过程中，约有45%的能量消耗是由空气阻力引起的^[2]。因此，发展汽车的气动减阻技术，对于实现节能减排及提高电动汽车的行驶里程有重要的意义。

汽车外形有着复杂的几何结构，为了更好地进行减阻优化，需要了解空气阻力的主要产生位置，约50%的空气阻力由车身前端和尾部的设计引起，25%~30%由车轮区域引起，其余阻力则来自车身底部^[3]。由于电动汽车相比于传统燃油汽车有着更为平坦的底部，该部分的空气阻力占比会更低。现有的气动减阻方法主要可以分为被动式减阻和主动式减阻两种。被动减阻主要通过改变车身的几何形状或增加固定的扰流板、导流罩和尾翼等附加装置实现，例如Wang等^[4]对Ahmed模型研究了不同尺寸、不同布置方式的导流板的减阻效果，测得最优减阻量约为10%。被动减阻方法比较常见，但缺陷是影响造型美观，以及可调节性较差。主动减阻方法是近年来汽车空气动力学领域研究的热点之一，

① 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项目（23DZ2229029），同济大学南昌汽车创新研究院前瞻课题（QZKT2020-12）资助。

其主要包括可延长的尾部扩散器^[5,6]、主动式尾部扰流板^[7]和主动射流控制等。其中，通过施加射流来改变车身附近流场状态的主动射流减阻方法，由于具有良好的可调节性和环境依从性，越来越受到研究者的关注。Roumeas 等^[8]基于格子-玻尔兹曼方法对方背体模型的尾流进行了数值模拟，并采用定常射流方式，使最优减阻量达到 29%。Krentel 等^[9]在 Ahmed 模型尾部倾斜面的底边进行脉冲射流试验，实现了 5.7% 的减阻效果。Zhang 等^[10]在后倾角为 25° 的 Ahmed 模型设置了四个射流器，在定常射流下每个射流器可减阻 6%~14%，组合使用可减阻 29%。吴开广等^[11,12]针对 MIRA 快背式模型，在其发动机罩后缘、车身尾部边缘、车身侧面等位置进行了主动射流研究，发现在尾部和侧面有较好的减阻效果。

在车轮减阻方面，除了扰流板、全封闭轮辋^[13]或主动开闭式轮辋^[14]等减阻方法以外，也有少量对主动射流的研究。2018 年，Lee^[15]基于 Fabijanic 两轮模型，初步研究了车轮区域射流的减阻机理，对比了车轮扰流板和垂直于地面方向的车轮前部射流的减阻效果，观察到射流可以使来流偏转，减少轮胎表面空气迟滞并降低轮罩内的空气流量，从而降低阻力。2020 年，张英朝等^[12]对 MIRA 快背式模型的多处位置进行主动射流减阻研究，其中，发现在前轮区域的主动射流可以使气流明显下行，减小前轮前部的压力，从而使阻力系数减小了 0.003。2021 年，Kaloki 等^[16]基于 DrivAer 模型对前轮前方进行了主动射流研究，比较了扰流板以及 90° 和向后 45° 射流的减阻效果，发现当射流速度大于 35m/s 时，向后 45° 射流可以使前轮气动阻力降低约 14%，并获得较好的整车减阻效果。

主动射流方法灵活性高、可控性强且适用范围广，但目前的研究主要基于简化的汽车模型，与具备复杂几何外形以及可旋转车轮、轮腔等结构的实车还有较大差别，且研究多针对车辆背部射流的情况，对车轮区域的研究较少。因此，本文针对某款电动汽车模型，开展前轮区域的主动定常射流研究，探究其气动减阻效果和减阻原理。

1 仿真模型与计算设置

1.1 电动车模型

本文主要采用某款小型电动汽车全尺寸模型进行研究。车身长 3.64m、宽 1.88m、高 1.47m，有后视镜，下车身装有电池包。该模型使用了六辐车轮，车轮半径为 0.265m，车轮带有制动盘等附件，轮胎均为光胎，模型示意如图 1 所示。



图 1 某电动汽车模型

1.2 计算设置

本研究的计算在 Fluent 2022R1 中进行，仿真采用的汽车外流场计算域如图 2 所示，计算域尺寸为 $10L \times 7.5W \times 5H$ 。计算域入口边界条件设置为速度入口，本研究设置为 $27.78m/s$ ；出口边界条件设置为压力出口，压力值为 $0Pa$ ；由于使用半车模型计算，计算域左右侧面和顶面设置为对称边界条件；图 2 中车辆区域对应整车风洞中的五带系统，依据车轮旋转设置为移动壁面，地面其他部分设置为非滑移壁面。车轮旋转模拟采用多参考坐标系（Multiple Reference Frame, MRF）方法，将车轮内旋转的流体区域划分为单独的旋转区，并在此区域内使用旋转坐标系，旋转子域和主域之间用交界面（Interface）连接，该方法能较高效准确地描述气流随车轮旋转而表现出的物理特征。体网格采用 Poly-Hexcore 方法^[17]，核心区为六面体网格，边界层和过渡区域为多面体网格，相比切割体网格，可以大大减小网格数量、改善网格质量，进而提高计算效率。针对计算域设置了 3 个加密区，分别对车轮、车尾和车体进行网格加密，体网格总数为 3257 万，体网格分布如图 3 所示。

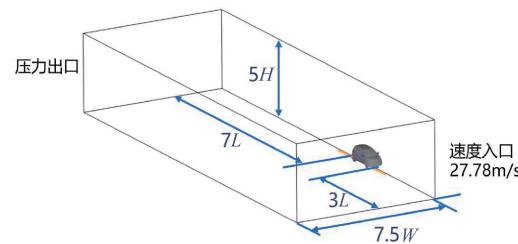


图 2 计算域

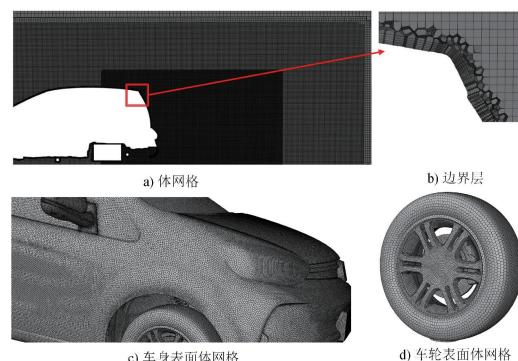


图 3 体网格分布

计算采用不可压缩耦合求解器，离散格式采用二阶迎风。湍流模型采用 GEKO 两方程涡黏模型，该模型是一种基于 $k-\omega$ 的两方程湍流模型，提供了六个自由模型系数，可以针对特定类型的应用进行调整，而不会对模型的基本校准产生负面影响。

1.3 数值方法验证

由于本文研究的某微型车缺乏风洞试验结果，所以无法对数值模拟方法（求解器、离散格式和湍流模型 GEKO $k-\omega$ 模型）进行直接验证。因此本文针对 DrivAer 标准模型，采用相同的网格策略和数值模拟设置，对其外流场进行仿真计

算，并与风洞试验结果^[18]进行对比分析。风洞试验测得整车的气动阻力系数为 0.255，采用本研究的数值模拟方法，计算的气动阻力系数为 0.264，仿真误差为 3.5%。同时，图 4 展示了 $y=0$ 中截线处仿真和试验结果的对比，可以看到在车身上部和底部表面压力系数的仿真值与试验值基本吻合。综上可知，本文数值模拟方法的可靠性较强。

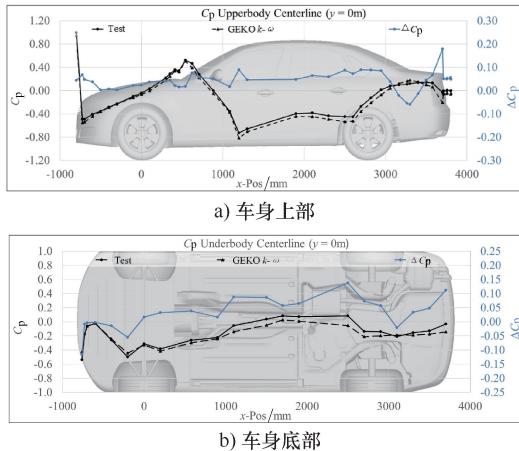


图 4 DrivAer 模型仿真与试验的表面压力结果对比 ($y=0$ 截面)

2 前轮区域的主动射流设置

2.1 射流槽布置与射流角度定义

之前的研究^[19]表明射流角度和动量系数是主动射流最关键的两个变量参数。因此本文重点探究电动车前轮区域射流槽的射流角度和动量系数对气动减阻的影响。参考之前的主动射流设计^[11,12,19]，并结合传统前轮扰流板参数以及本文电动车前轮区域形状，确定前轮前侧射流槽的布置如图 5 所示，采用矩形射流槽，长约 190mm，宽约 5mm。射流角度 θ 的定义如图 6 所示，规定垂直向下方为 0° ，向 $-x$ 方向偏转为负角度，向 $+x$ 方向偏转为正角度。

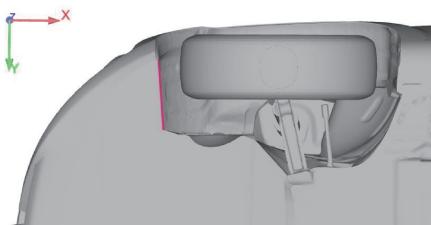


图 5 前轮射流槽布置

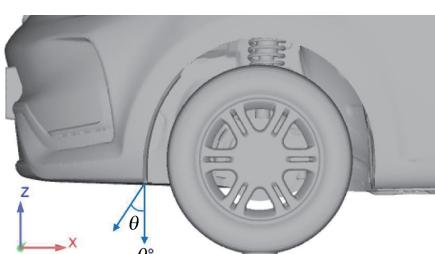


图 6 射流角度 θ 定义

2.2 动量系数定义

动量系数 C_μ 表示输入的射流能量，其定义如式 (1)：

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

式中，定义正在工作的射流槽面积之和为 A_{nozzles} ，单位为 m^2 ；模型在 x 方向的投影面积为 A_0 ，单位为 m^2 ；射流速度为 U_{jet} ，单位为 m/s ；来流速度为 U_∞ ，单位为 m/s 。

2.3 净节约功率 ΔP 定义

净节约功率 ΔP (简称净节率) 表示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，其定义如式 (2)：

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

式中，来流气体密度为 ρ_0 ，单位为 kg/m^3 ；射流气体密度为 ρ_{jet} ，单位为 kg/m^3 ；无射流基础工况的阻力系数为 C_{d0} ，当前工况的阻力系数为 C_d 。

2.4 前轮区域主动射流工况设置

基础工况 Baesline 为无射流工况，主动射流工况主要分为两组，见表 1。第一组研究动量系数为 0.5% 时，不同射流角度对乘车气动性能的影响，第二组研究设射流角度为 -30° 时，不同动量系数对整车气动性能的影响。

表 1 前轮区域射流工况表

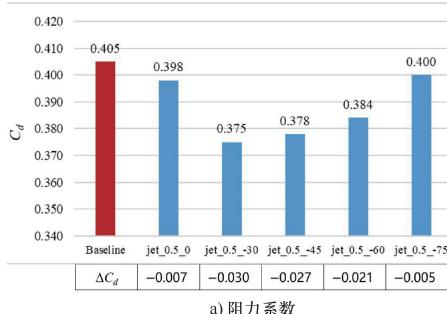
工况组别	工况名称	射流角度 θ	动量系数 C_μ (%)
1	jet_0.5_0	0°	0.50
	jet_0.5_-30	-30°	
	jet_0.5_-45	-45°	
	jet_0.5_-60	-60°	
	jet_0.5_-75	-75°	
2	jet_0.25_-30	-30°	0.25
	jet_0.50_-30		0.50
	jet_0.75_-30		0.75

3 结果分析

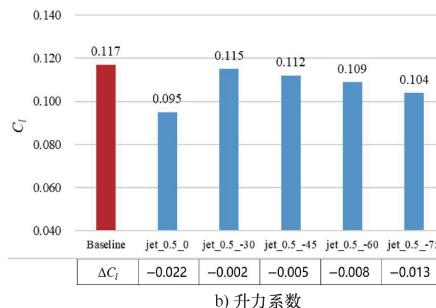
3.1 气动力分析

在第一组工况中，整车气动阻力系数如图 7a 所示。当动量系数为 0.5% 时，不同的射流角度 θ 均可以使电动车的整车气动阻力系数降低，当射流角度为 0° 时减阻量较小，只降低 7counts，射流角度为 -30° 时减阻量最大，达到 30counts，从 -30° 到 -75° ，随着射流角度的增大，气动阻力系数逐渐增大，减阻量逐渐减小， -75° 时减阻量最小，为 5counts。整车气动升力系数如图 7b 所示，当动量系数为 0.5% 时，不同的射流角度 θ 均使电动车的整车气动升力系数降低，当射流角度为 0° 时升力系数降低最多，为 22counts，射流角度为 -30° 时升力系数降低最少，为

2counts，从 -30° 到 -75° ，随着射流角度的增大，气动升力系数逐渐减小，减小量逐渐增大。

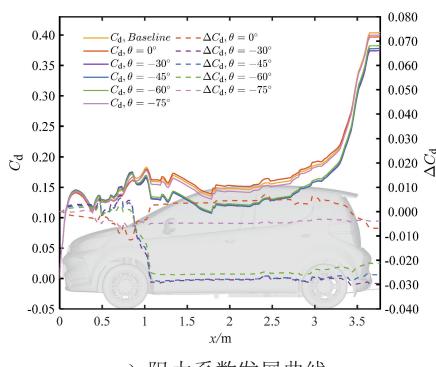


a) 阻力系数

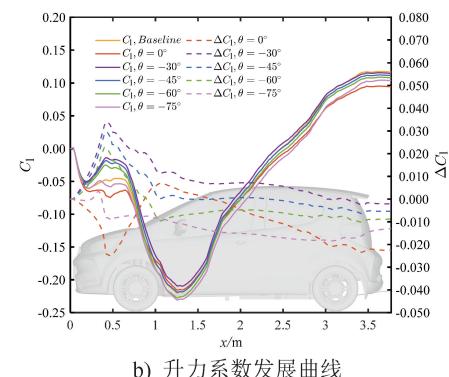
图 7 前轮区域主动射流对整车气动力系数的影响 ($C_\mu = 0.5\%$)

进一步分析射流角度对整车气动力系数的影响区域，图 8a、图 8b 分别展示了同一动量系数下不同射流角度时的气动阻力和升力发展曲线。在阻力发展曲线中可以看到，相比于 Baseline 工况，当射流角度为 -30° 、 -45° 和 -60° 时，从射流槽前方开始阻力系数都增大，到前轮中后侧阻力系数明显减小，此后无明显变化，到车尾部分阻力系数略微回升；而当射流角度为 0° 和 -75° 时，从射流槽前部开始阻力系数逐渐减小，到前轮中后部阻力系数回升，且 0° 工况下回升较大，到尾部阻力系数再次减小。在升力发展曲线中可以看到，当射流角度为 -30° 、 -45° 和 -60° 时，升力系数变化量在射流槽位置处达到最大，到前轮后部之前逐渐降低，射流角度越大，降低程度越大；当射流角度为 -75° 时，升力系数在射流槽前先升高，在射流槽后降低，此后缓慢降低，当射流角度为 0° 时，升力系数在射流槽前先降低，到前轮后部逐渐升高，此后又逐渐降低。

此后又逐渐降低。



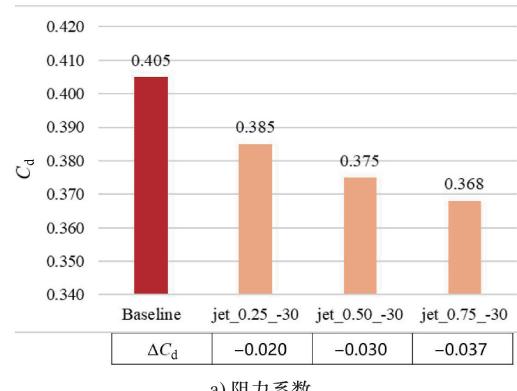
a) 阻力系数发展曲线

图 8 前轮区域主动射流对整车气动力系数发展曲线的影响 ($C_\mu = 0.5\%$)

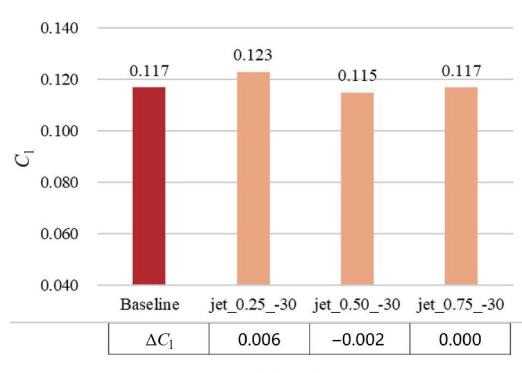
b) 升力系数发展曲线

图 8 前轮区域主动射流对整车气动力系数发展曲线的影响 ($C_\mu = 0.5\%$) (续)

在第二组工况中，整车气动阻力系数如图 9a 所示。当射流角度为 -30° 时，不同的动量系数均可以使电动车的整车气动阻力系数降低，且随着动量系数增大，射流速度增大，气动阻力系数逐渐减小，减阻量逐渐增大，当动量系数为 0.75% 时，减阻量最大，达到 37counts。整车气动升力系数如图 9b 所示，当射流角度为 -30° 时，不同的动量系数对气动升力系数的影响不明显，动量系数为 0.25% 时，整车气动升力系数增加了 6counts；动量系数为 0.5% 时，升力系数减小了 2counts；动量系数为 0.75% 时，升力系数无变化。

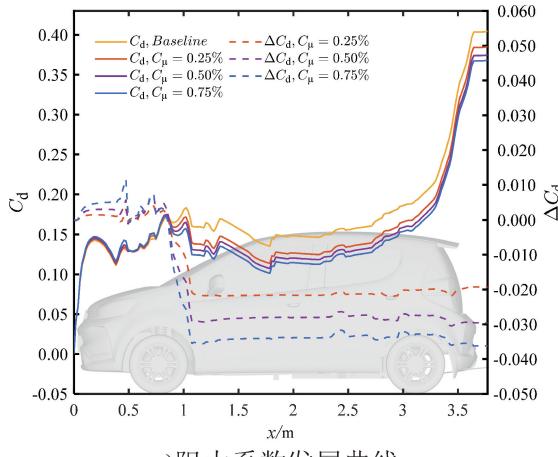


a) 阻力系数

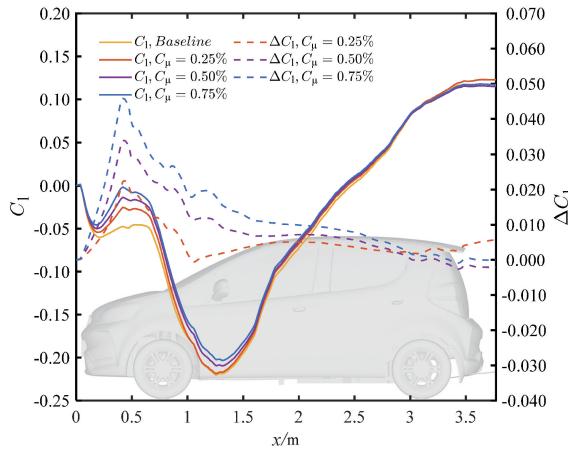
图 9 前轮区域主动射流对整车气动力系数的影响 ($\theta = -30^\circ$)

进一步分析动量系数对整车气动力系数的影响区域，图 10a、图 10b 分别展示了同一射流角度下不同动量系数时的气动阻力和升力发展曲线。在阻力发展曲线中可以看到，

相比于 Baseline 工况，不同的动量系数下，从射流槽前方开始阻力系数都增大，到前轮中后侧阻力系数大幅度减小，且动量系数越大，阻力系数的减小幅度越大，此后阻力系数无明显变化。在升力发展曲线中可以看到，不同的动量系数下，升力系数变化量在射流槽位置前达到最大，且动量系数越大，升力系数增大得越多，到前轮后部升力系数都逐渐减小，此后在 0.75% 和 0.5% 的动量系数工况下，升力系数的变化量缓慢减小，而动量系数为 0.25% 时，升力系数在车身后部的变化量有所回升。



a) 阻力系数发展曲线



b) 升力系数发展曲线

图 10 前轮区域主动射流对整车气动力系数发展曲线的影响 ($\theta = -30^\circ$)

3.2 净节率分析

图 11 给出了两组工况下的前轮区域主动射流净节率。在第一组工况中，相同的动量系数下，当射流角度为 -30° 时，达到了最高的净节率 527W，随着射流角度的增大，净节率逐渐减小，在 0° 和 -75° 时净节率为负值。结合前文中整车气动阻力系数结果，动量系数 0.5% 时， -30° 射流角度的气动阻力系数最小，净节率最高，节能效果好。

在第二组工况中，相同的射流角度下，动量系数增大，净节率先增大后减小，射流角度为 -30° 时，0.5% 动量系数下的净节率依然最高，此时整车气动阻力系数为 0.375，略大于动量系数为 0.75% 时的气动阻力系数 0.368。

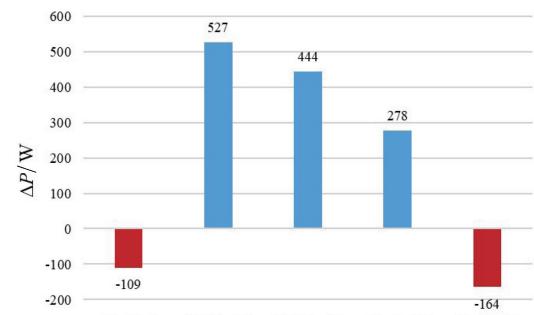
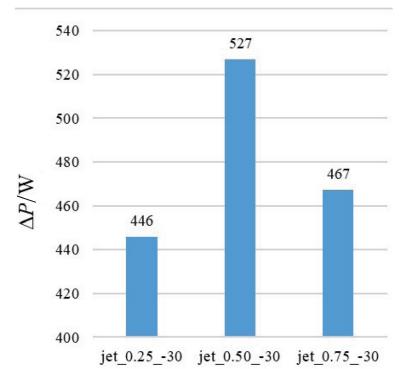
a) 第一组工况净节率 ($C_\mu = 0.5\%$)b) 第二组工况净节率 ($\theta = -30^\circ$)

图 11 给定工况下前轮区域主动射流净节率

3.3 前轮区域表面压力和周围速度场分布

图 12 展示了在典型工况下，前轮区域主动射流对前轮前部表面压力分布的影响。当射流角度为 -75° ，动量系数为 0.5% 时，前轮前部正压区上部略微减小，但减小不明显。射流角度为 -30° 时，前轮前部正压区明显减小，且在动量系数增大到 0.75% 时进一步减小，阻力降低，同时，前轮侧面负压区增大，表面压力减小。

图 13 展示了前轮区域主动射流对前轮后部表面压力分布的影响。当射流角度为 -75° ，动量系数为 0.5% 时，前轮后侧表面压力变化不明显，当射流角度为 -30° 时，前轮后侧表面压力减小，而车身侧面靠下部分表面压力增大。

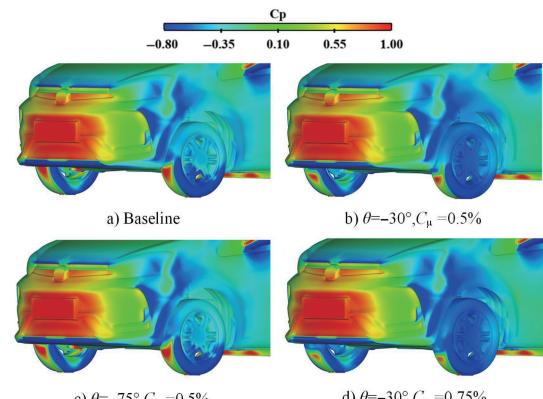


图 12 前轮区域主动射流对前轮前部表面压力分布的影响

图 14 展示了不同射流情况下前轮轮腔前部的表面压力

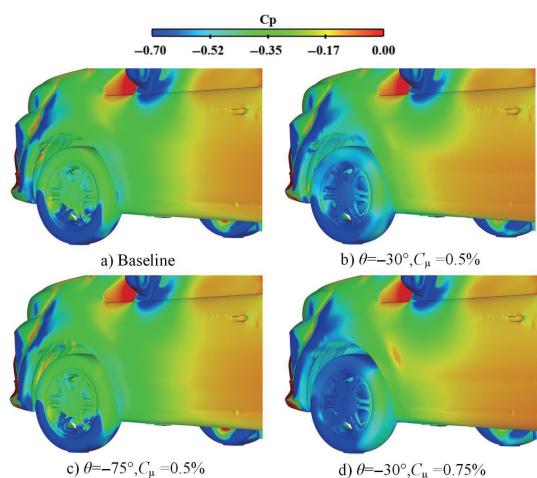


图 13 前轮区域主动射流对前轮后部表面压力分布的影响

分布。在射流角度为 -75° ，动量系数为0.5%的工况下，轮腔前部表面压力略微增大，但影响不明显。在射流角度为 -30° 的工况下，前轮轮腔表面的负压区明显增大，表面压力显著降低，当动量系数增大到0.75%时，前轮轮腔的表面压力进一步降低，轮腔前部表面压力降低对应了阻力发展曲线中轮腔前部区域气动阻力增大的现象。

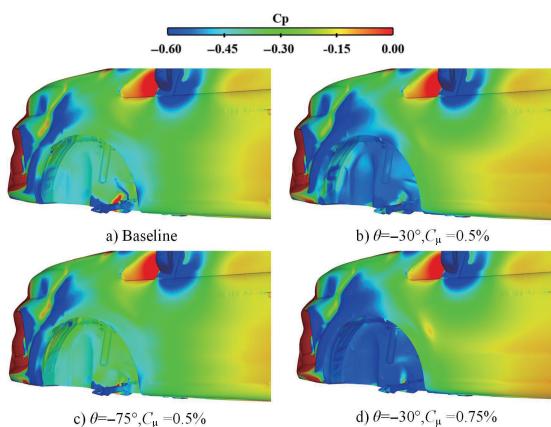


图 14 前轮区域主动射流对前轮轮腔表面压力分布的影响（前部）

在图 15 中可观察到前轮轮腔后部的表面压力分布。在射流角度为 -75° ，动量系数为0.5%的工况下，轮腔后部的正压区部分减小，在射流角度为 -30° 的工况下，轮腔后部表面的负压区显著增大，后缘处正压区明显减小，表面压力

降低，轮腔后部的气动阻力降低。

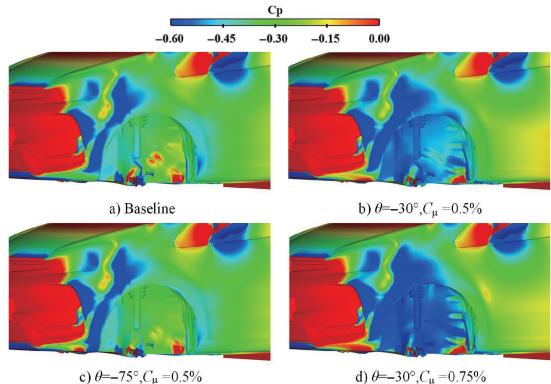


图 15 前轮区域主动射流对前轮轮腔表面压力分布的影响（后部）

根据图 16 所展示的 $y = 0.63\text{m}$ 平面的速度场进一步分析，在无射流工况下，前方来流直接冲击前轮迎风面，且有较多气流冲入前轮轮腔并从轮腔后侧流出，在 -30° 的射流工况下，射流对前方来流产生有效的阻滞作用，并在射流槽与前轮前表面之间形成涡流，动量系数增大，射流速度越大，阻滞作用越强，前方来流受到射流影响，在前轮前部的附着点向下移动，更少的气流冲击到前轮前部，因此正压区减小，前轮前部的气动阻力降低。另外， -30° 的射流也阻止了大部分来流直接冲入前轮轮腔，从而使从轮腔后侧流出的气流减少，前轮轮腔内速度场分布主要受到旋转车轮影响，轮腔上部和后部的气流呈反向流动，轮腔后部的表面压力降低，气动阻力降低；前轮后部的气流上行，因此前轮后部的表面压力也有所降低。而在 -75° 的前轮区域射流工况中，如图 16c 所示，由于射流角度过大，射流直接被前方来流包裹，依然有较多气流直接冲击前轮并冲入轮腔，未产生明显的阻滞效果也并不明显。

根据图 17 所示的 $z = 0.1\text{m}$ 平面的速度场分析， -30° 的前轮区域射流使部分气流在冲击前轮之前流向车轮两侧，且由于冲入轮腔内的气流减少，受旋转车轮影响，只有极少量气流从轮腔后侧流出，轮腔后侧表面压力降低，气动阻力减小。且由于从轮腔后侧流出的气流减少，外侧高速气流更贴近车身两侧，车身两侧的气流流速增大，但由于前轮轮腔后缘处的流动分离减弱，在车身侧面靠近前轮位置的表面压力有所增大。当射流角度为 -75° 时，由于未产生明显的阻滞现象，其速度场分布与无射流工况大致相同。

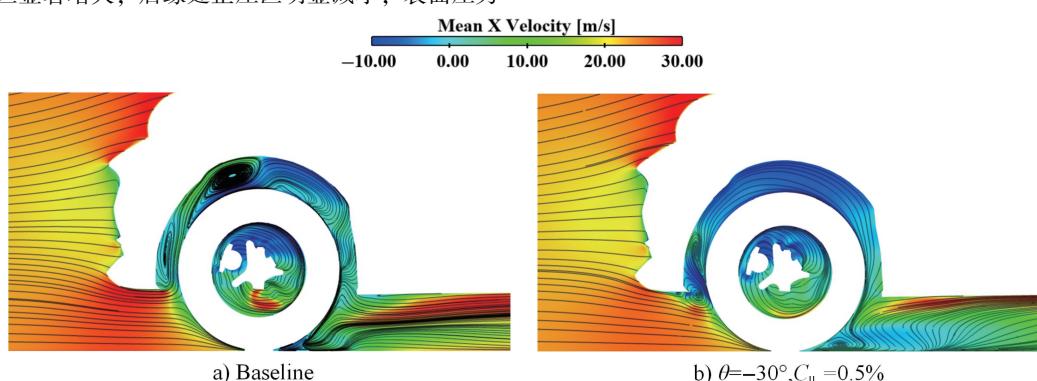
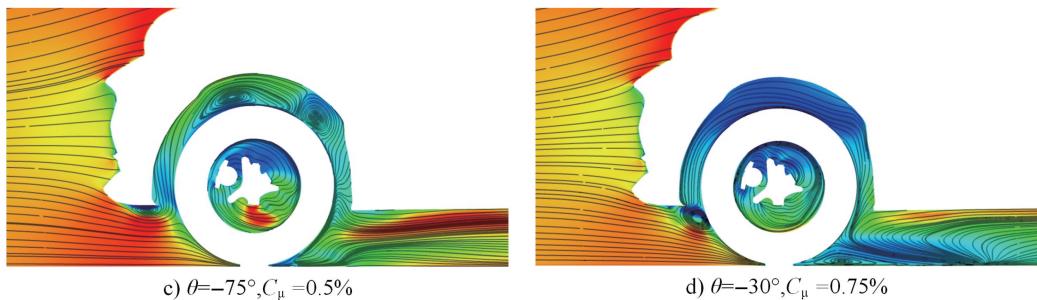
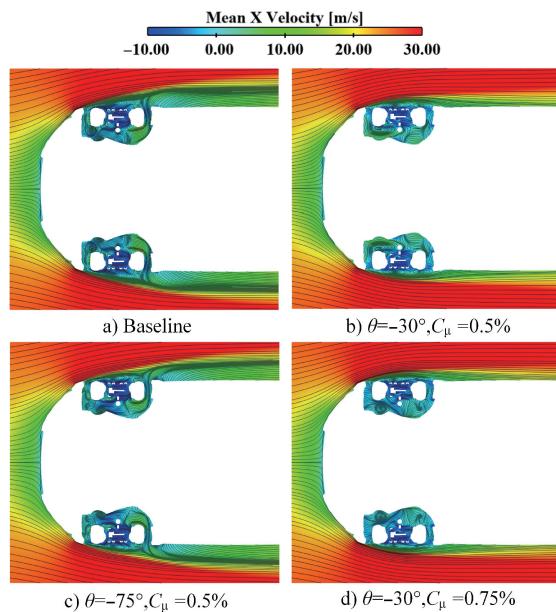


图 16 前轮区域主动射流对前轮附近速度场分布的影响 ($y = 0.63\text{m}$)

图 16 前轮区域主动射流对前轮附近速度场分布的影响 ($y=0.63\text{m}$) (续)图 17 前轮区域主动射流对前轮附近速度场分布的影响 ($z=0.1\text{m}$)

4 结论

本文针对某款电动车模型，在来流速度为 100km/h 的条件下，采用数值模拟对其前轮区域进行了主动气动减阻设计，研究了前轮区域主动射流对整车气动性能的影响，得到的主要结论如下：

- 在前轮区域设置主动射流，当射流角度在 -60° 和 -30° 之间时，射流角度越小，则减阻量越大，净节率越高，因为主动射流产生的阻滞作用阻止了前方来流直接冲击前轮和轮腔，改变了前轮区域的压力和速度场分布，减小了前轮区域的气动阻力；当动量系数为 0.5% 、射流角度为 -30° 时，达到最大减阻量 30counts ，净节率 527W ；当射流角度过大或过小时，无法充分产生阻滞作用，减阻效果较差，且净节率为负值，无节能效果。

- 在前轮区域设置主动射流，当射流角度为 -30° 时，动量系数越大，则射流速度越高，减阻量越大，气动升力无

明显影响，而净节率先增大后减小，因为其受射流速度和射流槽面积的影响较大。当动量系数为 0.5% 时，净节率最高，达到 527W ，节能性较好；动量系数进一步增大到 0.75% 时，整车的气动阻力减小，最大减阻量达到 37counts ，减阻效果提升，但净节率降低到 467W 。

综上所述，前轮区域主动射流主要影响电动车前轮附近的气动力和速度场分布，对前方来流产生阻滞作用，来降低前轮附近的气动阻力，通过组合合适的射流角度与动量系数，可以使减阻性和节能性都达到较好的效果。

本文针对车轮区域的主动射流气动减阻进行了初步探索，目前只分别考虑了射流角度和动量系数作为单因素的影响结果，在未来可以考虑将二者作为双因素进行优化设计，探究射流角度和动量系数的相互耦合作用，提出其减阻的最佳组合。本文对未来汽车主动气动减阻设计有重要的参考价值。

参 考 文 献

- [1] HENNING L B, MICHAEL D, ERIC R, et al. Ambient Temperature (20°F , 72°F and 95°F) Impact on Fuel and Energy Consumption for Several Conventional Vehicles, Hy-

brid and Plug-In Hybrid Electric Vehicles and Battery Electric Vehicle [C]//SAE 2013 World Congress and Exhibition. [S. l.: s. n.], 2013-01-1462.

- [2] 王拓. 低阻车体模型的主动减阻技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [3] SEBBEN S, VDOVIN A. Aerodynamics of Passenger Vehicles [R]. Gothenburg: Chalmers Technical University, 2016.
- [4] WANG H F, ZOU C, ZHANG Y P. Control of the Wake and Aerodynamic Drag of an Ahmed Model with 25deg Slant Angle by Using Deflectors [J]. Journal of Hunan University, 2014, 8 (4): 94-100.
- [5] KANG S O, CHO J H, JUN S O, et al. A Study of an Active Rear Diffuser Device for Aerodynamic Drag Reduction of Automobiles [C]//SAE 2012 World Congress & Exhibition. [S. l. : s. n.], 2012-01-0173.
- [6] KANG S O, JUN S O, PARK H I, et al. Actively translating a rear diffuser device for the aerodynamic drag reduction of a passenger car [J]. International Journal of Automotive Technology, 2012, 13 (4): 583-592.
- [7] UMUT A. Aerodynamics Concept Study of Electric Vehicles: Drag Reduction and Range Increase [D]. Chalmers: Chalmers University of Technology, 2017.
- [8] ROUMEAS M, GILLIÉRON P, KOURTA A. Analysis and control of the near-wake flow over a square-back geometry [J]. Computers & Fluids, 2009, 38 (1): 60-70.
- [9] KRENTEL D, MUMINOVIC R, BRUNN A, et al. Application of Active Flow Control on Generic 3D Car Models [J]. Active Flow Control II, 2010, 108: 223-239.
- [10] 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: 351-396.
- [11] 吴开广. 基于 MIRA 快背式模型的主动减阻机理研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2018.
- [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): 588-592.
- [13] ALEXEY V. Investigation of Aerodynamic Resistance of Rotating Wheels on Passenger Cars [D]. Chalmers University of Technology, 2013.
- [14] RENAULT. Renault Eolab Concept [Z/OL]. (2017-06-05) [2023-4-20]. <https://www.renault.co.uk/vehicles/concept-cars/eolab.htm>.
- [15] LEE S W. Computational analysis of air jet wheel deflector for aerodynamic drag reduction of road vehicle [J]. Microsystem Technologies, 2018, 24 (11): 4453-4463.
- [16] KALOKI L N, SANDRA K S B. Assessment of conventional and air-jet wheel deflectors for drag reduction of the DrivAer model [J]. Advances in Aerodynamics, 2021, 3 (1): 512-539.
- [17] 杨志刚, 杨婷, 夏超, 等. 有无车轮对低风阻车型气动特性的影响 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2021, 49 (S1): 54-62.
- [18] HUPERTZ B, CHALUPA K, KRUEGER L, et al. On the Aerodynamics of the Notchback Open Cooling DrivAer: A Detailed Investigation of Wind Tunnel Data for Improved Correlation and Reference [J]. SAE International Journal of Advances and Current Practices in Mobility, 2021, 3 (4): 1726-1747.
- [19] 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): 39-47.