

低阻附件对某低风阻车型气动影响研究

石咏薇^{1,2}, 杨 婷^{1,2}, 夏 超^{1,2}, 贾 青^{1,2}, 杨志刚^{1,2,3}

(1. 同济大学 汽车学院, 上海市 201804; 2. 同济大学 上海市地面交通风洞中心, 上海市 201804;

3. 北京民用飞机技术研究中心, 北京市 102401)

摘要: 以某低风阻电动汽车为研究对象, 分别对有无前轮扰流板、后轮侧板及后轮导流罩展开数值研究, 通过对比不同工况气动力、表面压力、流场计算结果, 评估了 3 种低阻附件对低风阻车型气动特性的影响。研究表明: 相较于基础工况, 仅去掉前轮扰流板、后轮侧板、后轮导流罩以及同时去掉后轮侧板及导流罩时, 该车总风阻力分别增大 3.0%、6.5%、-1.8%、1.2%; 低阻车总风阻力变化的主要贡献来自于前后轮区域、车底和背部; 低阻附件主要通过改变车轮区域的流场间接影响车底阻塞度, 进而改变车轮-车身空气动力学的相互作用, 从而给低阻车整车气动特性带来影响。

关键词: 低风阻车型; 低阻附件; 数值模拟; 气动特性

中图分类号: U461.1; O355

文献标志码: A

Influence of Low-Resistance Accessories on Aerodynamic Characteristics of Low-Resistance Vehicles

SHI Yongwei^{1,2}, YANG Ting^{1,2}, XIA Chao^{1,2}, JIA Qin^{1,2},
YANG Zhigang^{1,2,3}

(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, 102401, China)

Abstract: A numerical research is conducted on a low-resistance electric vehicle with or without front wheel spoiler, rear wheel side plate, and rear wheel deflector. By comparing the aerodynamic force, surface pressure, and the computed result of flow field, the effects of low-resistance accessories on the aerodynamic characteristics of these working conditions are evaluated. The result indicates that compared with the basic condition, when removing only the front wheel spoiler, the rear wheel side plate and the rear wheel deflector, and removing both the rear wheel side plate and the deflector, the total resistance of the vehicle is increased by 3.0 %, 6.5 %, -

1.8 %, and 1.2 % respectively. The main contribution to the change in the total resistance of the low-resistance vehicle came from the front and rear wheel areas, underbody, and base. The low-resistance attachments mainly affect the underbody obstruction indirectly by changing the flow field in the wheel area, which in turn changes the wheel-body aerodynamic interaction, thereby affecting the aerodynamic characteristics of the low-resistance vehicle.

Key words: low wind resistance car; low-resistance accessories; numerical simulation; aerodynamic characteristics

目前, 汽车工业非常关注汽车外形, 不断将研发力量投入于设计生产低风阻车身, 而现代汽车的车轮及其附件与底部结构对车辆的总风阻力有很大影响。研究表明, 高速车轮的空气阻力影响占整车气动阻力的 10%~15%, 由于车轮参数大都具有行业标准且一般由具体整车参数决定, 因而很难通过修改车轮模型从而达到减小气动阻力的效果, 所以研究车轮附件对整车的影响有着十分关键的作用。目前国内外在车轮附件对车轮周围流场的影响方面研究较少, 因此, 非常有必要对车轮附件气动减阻方案进行探索研究, 从而为现代化汽车车轮附件设计提供一定的数据参考, 也为车型升级、降阻减排提供具有参考价值的数据及方案^[1]。

国外对汽车气动附件(前、后扰流板)的研究始于 20 世纪 60 年代, 早期研究主要集中在赛车上。Janssen^[2](1973 年)最早发表了有关前扰流板(车轮附件)的研究论文, 文章通过对大众汽车的 Brasil 1600 X 车型添加不同位置、不同高度的扰流板研究了整车气动阻力系数的变化规律。20 世纪 90 年代之后, 随着计算流体动力学(CFD)技术的快速发展, 对车轮附件(前扰流板)的气动力学研究进一步深

化。Daniel G. Hyams^[3]采用CFD及风洞试验研究某全尺寸8级卡车,研究了装有扰流板的卡车在不同偏航角下的阻力系数;研究发现,整车阻力系数随偏航角先增大后减小,在 50° 时阻力系数达到极大值,约比零偏航角大2.5%,此后阻力系数逐渐减小,在 90° 时整车阻力系数比零偏航角小15%。国内对汽车气动附件的研究也取得了一定的成果,李争齐^[4]等人探讨了不同车身底部上翘角、尾部扰流板倾角和离地间隙对微车尾尾流分离点、尾涡特性及其气动特性的影响规律,并寻求低风阻的微车气动外形结构。胡兴军^[5]等针对某三厢轿车通过在车轮前增加合适的车轮扰流板有效的减少车轮两侧的气流分离,缩小汽车尾部涡流区域,有效的降低了气动阻力系数。但是文章中只研究扰流板宽度大于及小于车轮宽度两种工况,没有就高度、角度、位置等情况进行研究。杨志刚^[6]等人分别对旋转与静止工况下,前轮扰流板高度对整车气动阻力的影响进行了数值研究,研究发现,整车气动阻力系数均随车轮扰流板高度的增加呈现先减小后增大的趋势。Fu Yu^[7]等人设计了一种眉形扰流板,优化车身底部的流场,减小车轮的气动阻力,并利用数值模拟对基本模型的流场进行了仿真分析,仿真结果表明前轮扰流板减阻效果为24%,风洞试验表明减阻效果为22%,可降低2%的能耗。李冠群^[8]等人用数值模拟的方法探究车轮扰流板相对于车轮前后的安装位置对气动阻力系数的影响,研究发现车轮扰流板位于车轮前侧的方案效果更佳,并对车轮扰流板的尺寸进行参数化设计与优化。付宇^[9]应用计算流体力学方法评估出前后车轮扰流板的降阻效果及其耦合关系,结果表明添加前轮扰流板后,风阻系数下降了6%,其降阻效果明显优于后车轮扰流板,且前后车轮扰流板具有一定的耦合作用。

综上所述,对于车轮附近的低阻附件的研究多集中在扰流板的研究上,且发现前轮扰流板对于汽车气动减阻有积极作用。但上述研究均是针对传统车型展开,对于其它车轮周边低阻附件的研究较少,因此本文研究对象为某低阻车型,其车身包括轮边相关结构都是低阻形态,在此基础上对车轮扰流板的效果进一步开展探讨。本文以该低阻车型为研究对象,展开前轮扰流板、后轮侧板和后轮导流罩等低阻附件的数值研究,对有无低阻附件的该低阻车型气动力、部件表面压力、部件周围流场结构等模拟结果进行对比分析,探讨低阻附件对低阻车身气动特性的影响机理。

1 计算设置

1.1 计算模型

低阻车的气动阻力系数通常较小,因此对于低阻车的数值计算的准确性具有一定的挑战。本文的研究对象为同济大学地面交通风洞中心设计的一款低风阻车型的1:1简化模型,相对于实车,它的前端进气口与底部气流出出口进行了封堵,尺寸为 $4\,622\times 1\,948\times 1\,479$ (长 $L\times$ 宽 $W\times$ 高 H ,单位:mm),车轮与实车一致,包含轮辐、储能器等结构。称具有四轮的原始低阻车模型为“全车”模型;在“全车”的基础上仅将低阻车前轮扰流板去掉,称为“无前扰流板”模型;在“全车”基础上仅将后轮侧板去掉,称为“无后侧板”模型;单独将“全车”模型的后轮导流罩(及后轮扰流板)摘掉,称该模型为“无后导流罩”模型;最后,同时把“全车”模型的后轮侧板、后轮导流罩去掉,将该模型称为“无后侧板、后导流罩”模型。改版后的4种低阻车几何模型如图1所示。

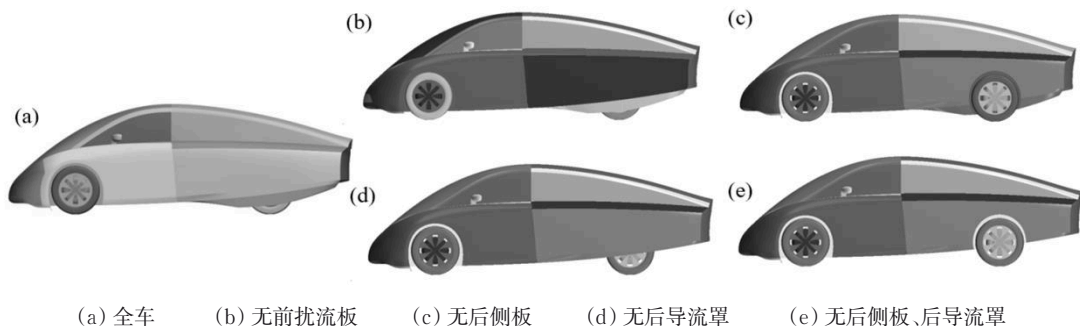


图1 低阻车几何模型

Fig.1 Car models

1.2 仿真设置

计算域的具体尺寸设置如图2所示,其尺寸为 $10L \times 15W \times 5H$ 。入口边界条件设置为速度入口,速度为30 m/s,出口边界条件设置为压力出口,压力值为0 Pa,左右两侧及上侧设置为对称边界条件,以减少计算域对流场的影响。并且为了尽量还原风洞真实环境,按照风洞试验工况同等比例绘制了地面五带系统(见图2),地面前端设置为滑移边界,对应风洞的边界层抽吸系统,防止边界层发展。中央移动带设置为移动壁面,速度为30 m/s,其他地面部分和车体表面设置为固定壁面。

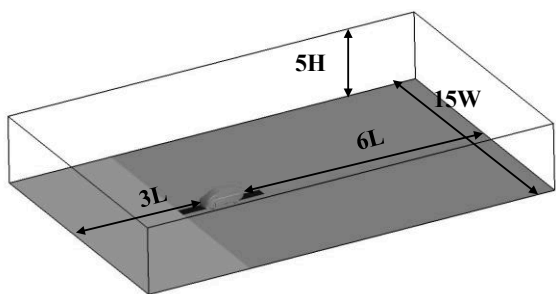


图2 计算域尺寸设置

Fig.2 Computational domain size

整体网格采用混合网格(poly-hexcore),核心区采用六面体网格,边界层和过渡区域采用多面体网格。针对计算域设置了5个加密区,分别对车轮、车尾、车体进行网格加密,提高计算精度。本文所采用的数值计算方法得到过实验验证^[10]。

2 结果与讨论

2.1 气动阻力

为了更好地分析低阻附件对低风阻车型车身不同部件的气动力变化情况,将车身分为9个部件,分别是前轮室、后轮室、前轮、后轮、垂直背部、车底、车身后部(包括车身后脸、引擎盖、前风窗、前部左右侧风窗、A柱子、车身后半部侧围、前半部分车顶、后视镜等部位)、车身后部(包括后部左右侧风窗、C柱、车身后半部侧围、斜背等部位)、其他(包括导流罩、扰流板等部位)。

图3为车轮旋转、地面移动状态下各工况下低阻车模型总气动阻力及车身各部件气动阻力对比情况。由总气动阻力对比可以看出,无后侧板、无前扰流板、无后侧板及后导流罩工况下,低阻车的总阻力相比于全车都有所升高,分别升高了6.5%、3.0%、1.2%,增阻程度依次减小,而无后导流罩工况下,低

阻车与全车相比总阻力降低了1.8%。这说明后侧板、前扰流板结构对车轮旋转状态下的低阻车均有减阻作用,且后侧板的减阻作用最强,而后导流罩结构具有增阻效果。

接下来通过各部件气动阻力变化详细分析低阻车总阻力变化原因。无前扰流板工况相比于全车(指前轮扰流板、后轮侧板和后轮导流罩都具备的原始低阻车),前轮及前轮室阻力变化最大,车底阻力也有一定增大,但增幅较小。因此去掉前轮扰流板后,低阻车前轮和前轮室对总气动阻力的增大有主要影响,其中前轮在去掉前轮扰流板后阻力大幅增加,前轮室阻力显著减小,两者综合作用导致总阻力有所增加。

与全车(指前轮扰流板、后轮侧板和后轮导流罩都具备的原始低阻车)相比,无后侧板工况,车上的阻力变化较大的部位依次有:后轮室、后轮、车底和背部。其中后轮室和背部的阻力增大,阻力系数 C_d 值的增量分别为0.049、0.007,对总阻力的增加有正向贡献,后轮和车底的阻力系数分别减小了0.032、0.012,对总阻力的增大有负贡献。

当只把低阻车全车的后轮导流罩去掉时,车底、背部和后轮室的阻力受影响较大,其中车底阻力变化量最大,阻力系数减小了0.011,其次是背部、后轮室,这两个部位阻力系数分别增大了0.008、0.006,除了两车型车身上的共有部件外,后导流罩本身阻力的消除综合导致了无后导流罩低阻车总气动阻力的减小。

将低阻车上后轮侧板、后轮导流罩同时去掉时,阻力变化较大的部位及其阻力系数变化量依次是:背部(+0.01)、后轮室(+0.018)、车底(-0.014)、其他(-0.008),主要来自于后轮导流罩本身、后轮(-0.004),综合了仅去掉后轮侧板和仅去掉后轮导流罩结构对各部件的影响,以上重要部位的阻力变化趋势与前两个工况中的相同,但阻力变化量有所改变,其中背部受影响程度变强,以上各部件的阻力变化综合导致了总气动阻力的增大。

低阻车全车单独去掉后轮侧板、单独去掉前轮扰流板、同时去掉后轮侧板和后轮导流罩均导致整车阻力增大,单独去掉后轮导流罩导致整车阻力减小。仅去掉前轮扰流板时,气动阻力受影响较大的部位主要有前轮及前轮室、车底;后轮侧板、后轮导流罩有无主要影响后轮及后轮室、车底和背部的阻力。下面就车轮旋转状态下各低阻车模型的前后轮及前后轮室、车底和背部表面压力及周围流场情况

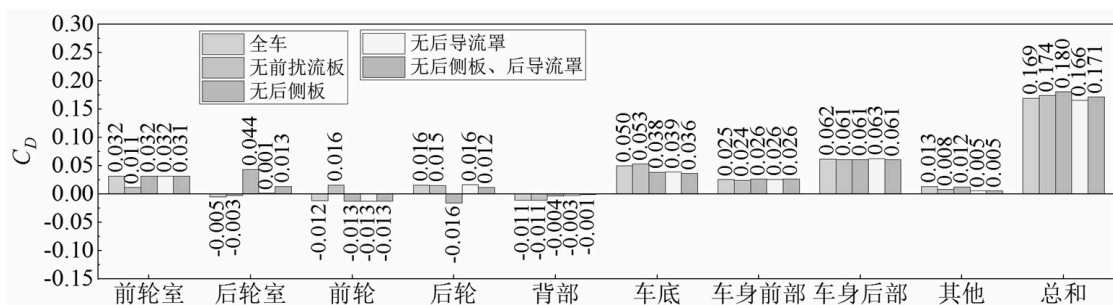


图3 整车及部件气动阻力对比

Fig.3 Comparison of aerodynamic resistance of complete vehicle and parts

进行详细对比分析,探究部件气动阻力变化原因。

2.2 部件表面压力分布及其周围流场结构

气动阻力的变化主要来源于物体表面压力的变化,而表面压力的变化与其周围的流场结构又有着密不可分的关系。因此为了深入探讨低阻附件与低风阻车型气动力变化之间的关系,接下来对增加低阻附件后气动力发生重要改变的部位(前轮及前轮室、后轮及后轮室、底部、背部)进行研究,重点分析其表面压力分布及变化情况。

2.2.1 前轮及前轮室

图4、图5分别展示了RR(MG)(RR代表前后轮旋转, MG代表地面移动)状态下5种低阻车的前轮、前轮室表面压力分布情况。由图可以看出,前轮扰流板对前轮及前轮室表面压力分布有较大影响,会导致前轮及前轮室后部压力明显降低,从而使得前轮阻力大幅增加、前轮室阻力显著减小。而去掉后轮侧板、后轮导流罩对前轮及前轮室表面压力影响较小,因此它们的前轮及前轮室阻力相对于全车工况也几乎没有变化。

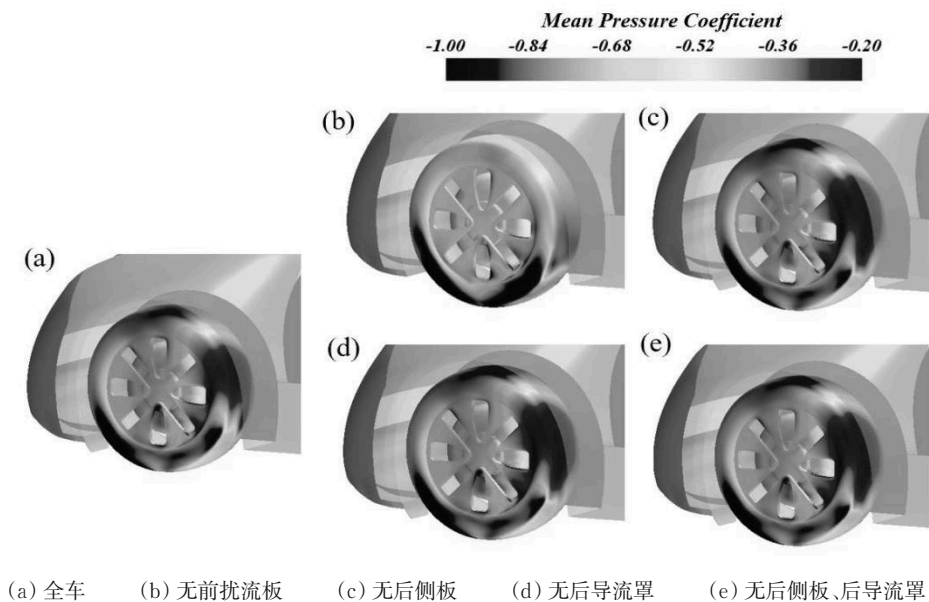


图4 前轮表面压力分布

Fig.4 Surface pressure distribution of front wheel

2.2.2 后轮及后轮室

各低阻车后轮及后轮室表面压力分布分别如图6、图7所示,对车轮旋转状态下摘除不同附件的工况与全车工况进行对比分析,当低阻车仅去掉前轮扰流板时,后轮及后轮室表面压力整体均匀下降,导致后轮及后轮室阻力变化不大。当仅去掉后轮侧板

时,后轮及后轮室整体压力上升尤其是后部压力大幅增加,导致后轮室阻力明显增大、后轮阻力显著减小。当仅去掉后轮导流罩时,后轮前侧下部压力增大、并且前轮室整体表面压力均匀增大,相较于全车后轮及后轮室后部负压消失,综合导致后轮阻力几乎不变、后轮室阻力有一定程度增大。

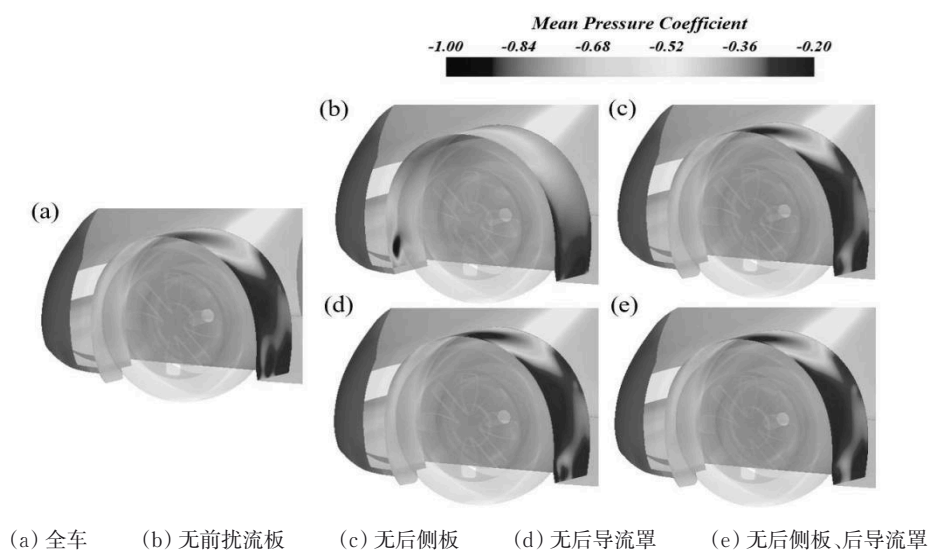


图5 前轮室表面压力分布

Fig.5 Surface pressure distribution of front wheel chamber

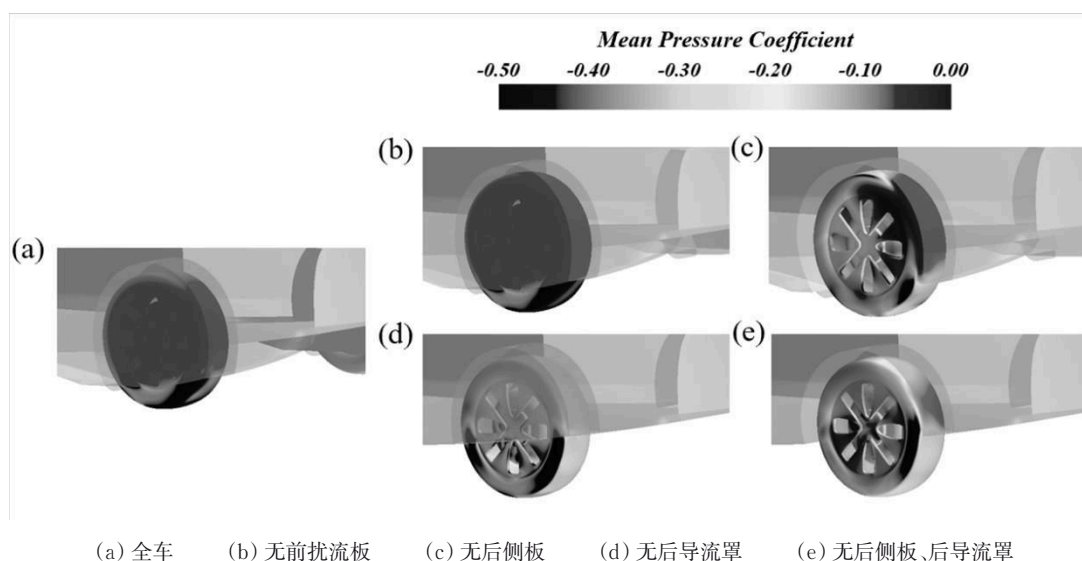


图6 后轮表面压力分布

Fig.6 Surface pressure distribution of rear wheel

2.2.3 车身底部

图8展示了低阻车各工况车底表面压力分布,去掉前轮扰流板后车底整体压力降低,车底阻力增大;仅去掉后轮侧板、仅去掉后轮导流罩、同时去掉后轮侧板和后轮导流罩工况中的车底中后部压力相比于全车工况均有所增大,车底压力的增大导致车底阻力减小。车底表面压力的变化与前轮扰流板、后轮侧板、后轮导流罩有无对前后轮室中的流动结构、车轮尾迹及车底气流流速的改变密切相关。从图9也可看出,去掉前轮扰流板会使车底流速增大,而去掉后轮侧板、后轮导流罩会导致车底流速减小。

2.2.4 车身背部

图10展示了各工况背部表面压力分布情况,仅去掉前轮扰流板对背部压力影响不大。前轮及前轮室周围流场对前轮扰流板有无的抗干扰性增强、受影响程度降低,进而导致车底流速变化量相对减小,背部压力及阻力几乎不变。仅去掉后轮侧板、仅去掉后轮导流罩、同时去掉后轮侧板及后轮导流罩工况下低阻车背部表面压力明显降低,进而导致背部阻力大幅增大。通过图9及图11也可看出,前轮扰流板的摘除会导致车底流速增大,后轮侧板、后轮导流罩的消除会导致车底流速减小、后轮尾迹增大,后轮尾迹与车身尾迹的相互作用也增大。

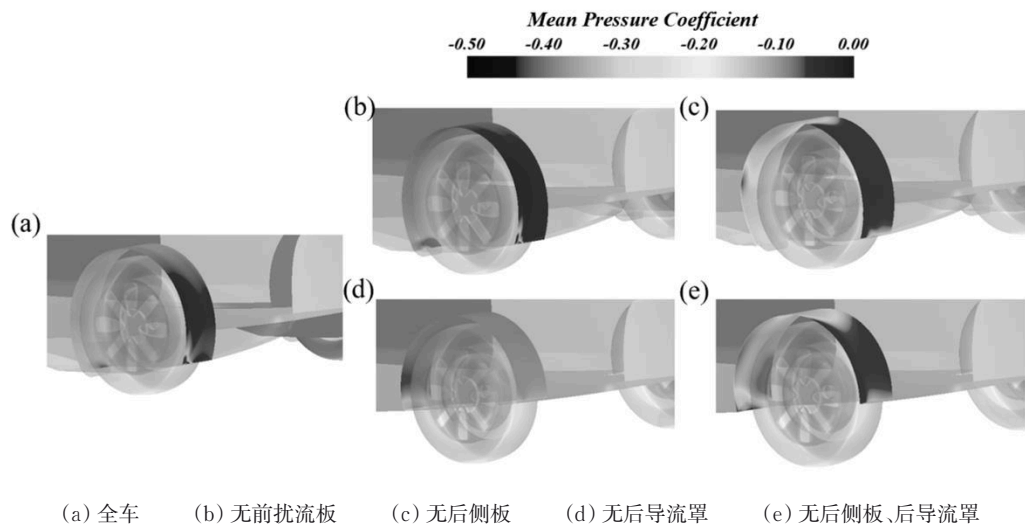


图 7 后轮室表面压力分布

Fig.5 Surface pressure distribution of rear wheel chamber

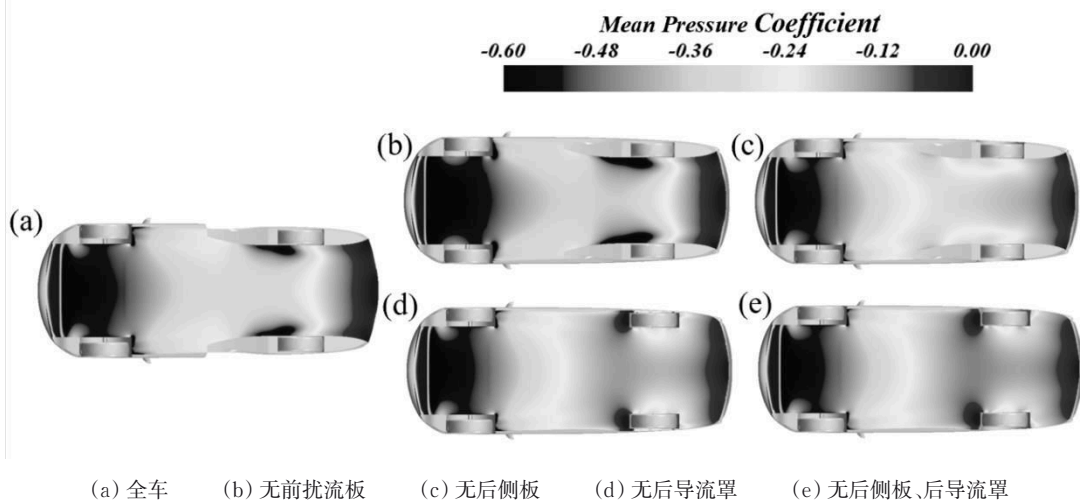


图 8 车底表面压力分布

Fig.8 Surface pressure distribution of vehicle underbody

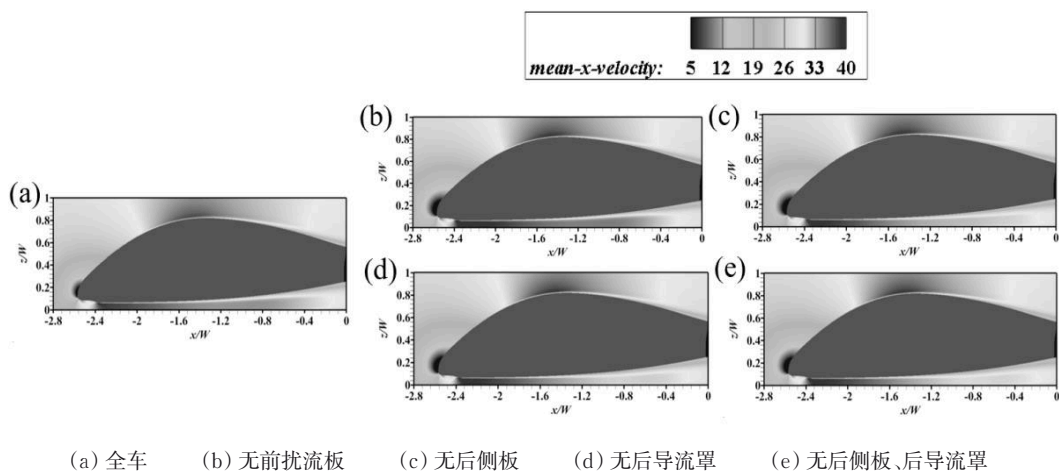


图 9 车身中截面速度场分布

Fig.9 Velocity field distribution in the cross section of the car body

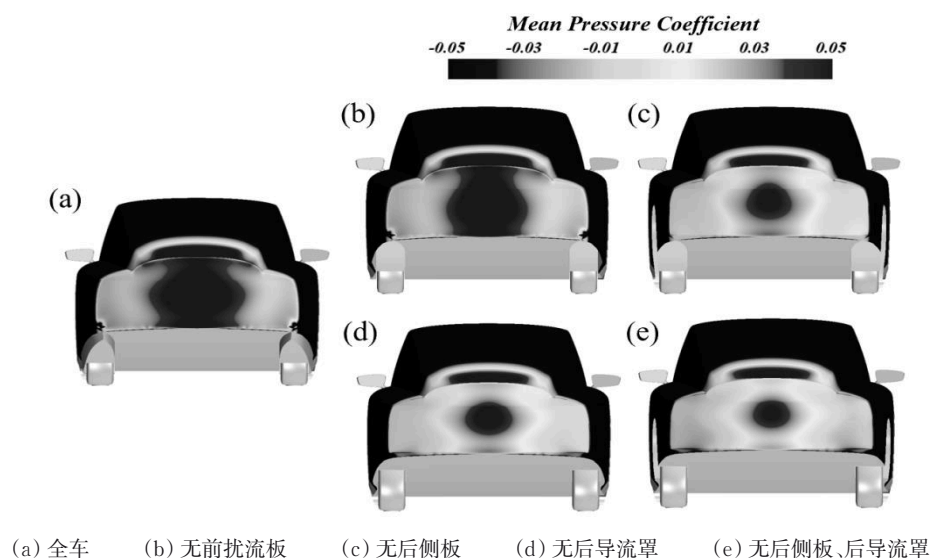
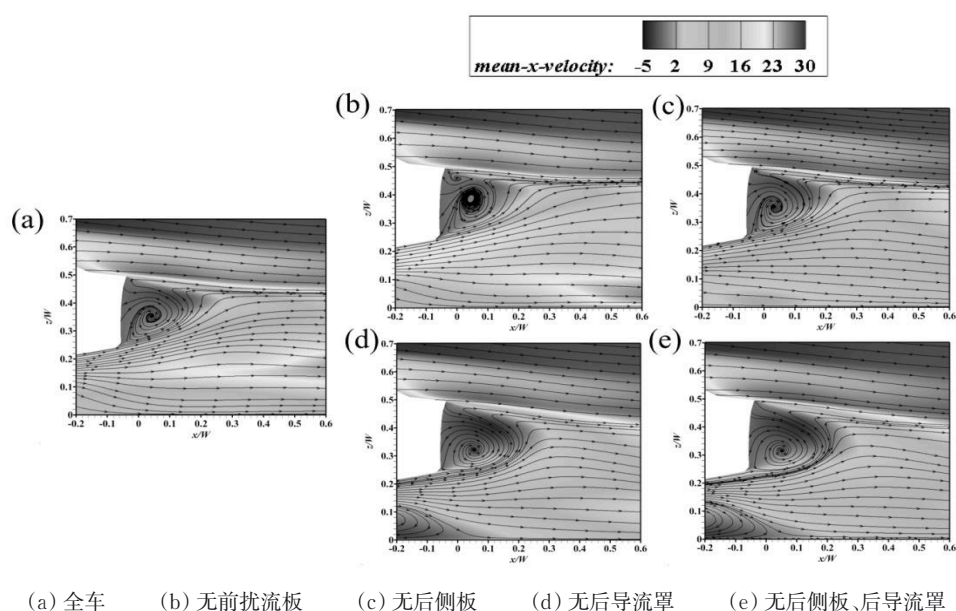


图 10 背部表面压力分布

Fig.10 Surface pressure distribution of back

图 11 $y=-0.52$ 平面流线图Fig.11 $y=-0.52$ plane streamline diagram

3 结论

本文主要探究前轮扰流板、后轮侧板和后轮导流罩三种低阻附件对低阻车气动特性的影响,主要结论如下:

(1) 与全车(系指前轮扰流板、后轮侧板和后轮导流罩都具备的原始低阻车)相比,仅去掉前扰流板、后轮侧板、后轮导流罩和同时去掉后轮侧板及导流罩时,低阻车的总阻力分别增大了 3.0%、6.5%、-1.8%、1.2%;去掉前扰流板相当于减小车

底阻塞,总阻力变化的贡献主要来源于前轮区域、车底、背部;去掉后轮侧板、后轮导流罩相当于增大车底阻塞,总阻力的变化主要来自于后轮区域、车底、背部。

(2) 仅去掉后轮导流罩时,后轮底部直接受来流冲击导致后轮及后轮室前部压力增大;车底气流更多进入后轮室,且后轮之间车底通道面积增大,导致后轮之间气流流速降低,同时车底两侧高压气流流入,使得车底整体压力增大;后轮尾迹增大导致背部压力降低,综合导致低阻车总阻力减小。可见,低

阻车总气动阻力的变化受车轮、轮室、车底和背部表面压力改变的综合影响。

综上所述,3个低阻附件主要是通过改变轮室及车轮周围的流动结构,间接影响车底阻塞度,进而影响车底流场、车身尾迹状态,从而改变低阻车整车的气动特性。其中前扰流板主要影响前轮区域,后侧板及后导流罩主要影响后轮区域。

参考文献:

- [1] 安阳. 基于尾部附件的轿车气动减阻研究[D]. 长春: 吉林大学, 2012.
AN Yang. Research on the aerodynamic drag reduction of the passenger car based on rear accessories [D]. Changchun: Jilin University, 2012.
- [2] JANSSEN L J, HUCHO W H. The effect of various parameters on the Aerodynamic drag of passenger cars [J]. BHRA Fluid Eng, 1973, 6(3): 223.
- [3] HYAMS D G, SREENIVAS K, PANKAJAKSHAN R. et al. Computational simulation of model and full scale Class 8 trucks with drag reduction devices [J]. Computers and Fluids, 2011, 41(1): 27.
- [4] 李争齐, 王华奥, 黄凯. 基于CFD的某车型外流场分析及车身改进[J]. 现代机械, 2018(3): 90.
LI Zhengqi, WANG Huao, HUANG Kai. Flow field analysis and body improvent of a car based on CFD [J]. Modern Machinery, 2018(3): 90.
- [5] 胡兴军, 李腾飞, 郭鹏, 等. 车轮扰流板对轿车风阻的影响[J]. 吉林大学学报(工学版), 2012, S1: 32.
HU Xingjun, LI Tengfei, GUO Peng, et al. Influence of wheel spoiler on aerodynamic drag of passenger car [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology), 2012, S1: 32.
- [6] 贾青, 沙潇, 杨志刚. 前轮扰流板高度对复杂轿车风阻的影响[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2017, 45(1): 87.
JIA Qing, SHA Xiao, YANG Zhigang. Influence of front wheel spoiler height on complex car drag [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2017, 45(1): 87.
- [7] FU Y, WEI Q Q. Simulation and testing of drag reduction effect of eyebrow front wheel spoiler [C]// Proc. SPIE 12081, Sixth International Conference on Electromechanical Control Technology and Transportation (ICECTT 2021). Chongqing: SPIE, 2021.
- [8] 李冠群, 胡兴军, 廖磊, 等. 车轮扰流板外形参数的DOE设计与低风阻优化 [C]// 第二十七届全国水动力学研讨会文集(上册). 北京: 海洋出版社, 2015: 660.
LI Guanqun, HU Xingjun, LIAO Lei, et al. Design of experiment and low-wind resistance optimization of the wheel spoiler shape parameters [C]// Proceedings of the 27th National Conference on Hydrodynamics. Beijing: China Ocean Press, 2015: 660.
- [9] 付宇. 汽车车轮扰流板降阻效果数值模拟分析[J]. 汽车工程师, 2018(7): 37.
FU Yu. Numerical Simulation Analysis on Drag Reduction of Vehicle Wheel Spoiler [J]. Automotive Engineer, 2018(7): 37.
- [10] 杨婷. 低风阻车型车轮-车身空气动力学相互作用研究[D]. 上海: 同济大学, 2022.
YANG Ting. Studies on wheel-vehicle aerodynamic interactions of low-drag models [D]. Shanghai: Tongji University, 2022.