

## 某SUV底盘空气动力学性能优化研究

王庆洋<sup>1</sup>, 肖垚<sup>2</sup>, 吴雁飞<sup>1</sup>, 赵志明<sup>3</sup>, 马发跃<sup>3</sup>

(1. 中国汽车工程研究院股份有限公司 风洞中心, 重庆 401122;  
2. 优跑汽车技术(上海)有限公司, 上海 200233; 3. 重庆长安汽车股份有限公司 汽车研究总院, 重庆 401120)

**摘要:** 汽车底盘空气动力学性能优化对降低整车空气阻力和升力有重要影响, 针对底盘区域进行空气动力学性能优化设计是提升整车动力经济性的重要途径。针对某款运动型多用途汽车 (Sport Utility Vehicle, SUV) 开展整车外流场计算流体力学 (Computational Fluid Dynamics, CFD) 仿真分析, 对比了 Realizable  $k-\epsilon$  和 SST  $k-\omega$  两种湍流模型仿真精度, 选用 Realizable  $k-\epsilon$  湍流模型进行底盘空气动力学方案设计。结合该SUV底盘特征及仿真流场分析结果, 在尽可能降低整车成本的前提下, 设计前保险杠下部阻风板、前轮挡板斜梯、副车架后部导流板、底盘中部护板以及尾部消音器造型优化共5种空气动力学方案, 并进行了实车风洞试验验证。结果表明, 5种方案对整车空气阻力性能提升均有不同程度的贡献, 其中尾部消音器造型优化减阻效果明显, 实车空气阻力系数降低2.99%; 综合采用5种底盘空气动力学方案后空气阻力系数共降低5.16%, 升力系数降低21.00%, 有效实现节能降阻, 并有助于提高整车行驶稳定性。

**关键词:** 运动型多用途汽车; 底盘; 空气阻力; 风洞试验; 空气动力附件

中图分类号: U461.1 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.2095-1469.2024.01.06

## Research on Aerodynamic Design Optimization for an SUV Chassis

WANG Qingyang<sup>1</sup>, XIAO Yao<sup>2</sup>, WU Yanfei<sup>1</sup>, ZHAO Zhiming<sup>3</sup>, MA Fayue<sup>3</sup>

(1. Wind Tunnel Center, China Automotive Engineering Research Institute Co., Ltd., Chongqing 401122, China;  
2. U Power Automotive Tech (Shanghai) Limited, Shanghai 200233, China;  
3. Chang'an Auto Global R&D Center, Chang'an Automobile Co., Ltd., Chongqing 401120, China)

**Abstract:** Optimizing the aerodynamic performance of the vehicle chassis has an important impact on reducing the aerodynamic drag and lift of the vehicle. The optimized design in the chassis area is a crucial approach to improve the fuel economy and power of the vehicle. In this paper, a Computational Fluid Dynamics (CFD) simulation analysis of the external flow field is conducted for a sport utility vehicle (SUV). The paper compares the simulation accuracy of Realizable  $k-\epsilon$  and SST  $k-\omega$  turbulence models, ultimately selecting the Realizable  $k-\epsilon$  turbulence model for the aerodynamic design of the chassis. Combining the SUV chassis characteristics and the flow field analysis, and aiming to minimize the overall cost, the paper designed five aerodynamic proposals for the chassis, including the front lower spoiler, the front wheel baffle, the sub-frame rear spoiler, the middle chassis guard and the tail muffler shape optimization. A full-scale wind tunnel test was carried out to verify the CFD simulation results. The results show that all five chassis proposals

收稿日期: 2022-11-14 改稿日期: 2022-12-30 网络首发日期: 2023-05-26

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFE0100100)

参考文献引用格式:

王庆洋, 肖垚, 吴雁飞, 等. 某SUV底盘空气动力学性能优化研究[J]. 汽车工程学报, 2024, 14(1): 60-71.

WANG Qingyang, XIAO Yao, WU Yanfei, et al. Research on Aerodynamic Design Optimization for an SUV Chassis [J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, XXXX, XX (XX): 60-71. (in Chinese)



contribute to the improved aerodynamic performance. The tail muffler shape optimization has a notable impact on drag reduction, decreasing the vehicle's drag coefficient by 2.99%. When the five proposals are combined, the drag coefficient and lift coefficient are reduced by 5.16% and 21%, respectively. The study effectively achieves energy-saving and drag reduction, and improves driving stability of the vehicle.

**Keywords:** sport utility vehicle; chassis; aerodynamic drag; wind tunnel test; aerodynamic accessories

整车空气动力性能是汽车外造型设计开发的关键指标之一。优异的空气动力性能对改善车辆行驶性能，提高车辆行驶稳定性与燃油经济性有重要作用。汽车上车体造型是空气阻力的主要来源之一，然而汽车底盘的空气动力学设计也对整车阻力影响较大<sup>[1]</sup>。据研究表明，底盘空气阻力占汽车总空气阻力的30%<sup>[2]</sup>。由于底盘结构复杂，排气系统、悬架、燃油箱等底盘零部件直接暴露在来流空气中，在高速行驶时，高速气流直接冲击裸露零部件，导致底盘气体流动结构复杂，产生强分离漩涡，影响整车尾部流场，增大整车空气阻力<sup>[3]</sup>。同时，底盘结构也和升力的表现强相关。优化整车底盘流场对提升整车空气动力性能至关重要<sup>[4]</sup>。

此前，业界内许多专家学者对于标准汽车模型MIRA、Ahmed的气动力表现进行研究<sup>[5-6]</sup>，但此类模型简化较多，无法真实反映实车底盘高速流场特性。近年来，国内外对整车底盘减阻的研究日趋完善，其主要方法为整体优化、局部优化以及添加气动附件等。2013年，五邑大学杜春英<sup>[1]</sup>设计了一种符合空气动力学形状的功能性底盘护板，在保证汽车燃油经济性的基础上提升汽车操纵稳定性和安全性。2014年，长城汽车徐鹏等<sup>[7]</sup>针对某SUV车型通过增加高度80 mm的气坝、发动机舱底护板，整车空气阻力系数由0.363降至0.340，综合油耗降低0.3 L/100 km，同时车辆的高速操纵稳定性得到大幅提高。2015年，北京航空航天大学康宁等<sup>[8]</sup>利用CFD仿真方法计算了汽车车轮流场，从前轮阻风板位置、宽度、曲率半径及高度4个因素研究其对整车空气动力性能的影响规律，阻风板外侧与车身底部圆弧平齐、内侧与车轮内侧平齐、曲率半径为15 mm、高度为10 mm时，空气阻力系数降低14.7%。2016年，东风汽车郭军朝等<sup>[9]</sup>运用

CFD仿真与试验技术相结合的方法分析了某SUV车型不同车底状态下的空气动力特性，通过增加车底油箱前护板、发动机下护板使整车空气阻力系数降低了0.013。2017年，吉林大学黄珊等<sup>[10]</sup>结合数值仿真和参数化技术研究方法，对比分析底盘设计因素对整车空气动力性能的影响规律，总结归纳底盘形式对空气动力特性的影响趋势，最终流线型模型空气阻力系数较基础模型降低13.01%。2017年，奇瑞捷豹路虎汽车有限公司CHALIGNÉ等<sup>[11]</sup>利用数值仿真分析结合风洞试验的方法对第5代Discovery车型进行整车空气动力性能优化，通过优化发动机下护板以及增加油箱、后悬架、备胎导流板等底盘零部件，在保证其越野性能、热害性能的同时，降低整车空气阻力系数约3%。2019年，德国保时捷汽车公司THOMAS<sup>[12]</sup>通过对第3代Cayenne车型进行外造型空气动力性能优化，采用添加底盘空气动力附件等方式，改善其动态行驶特性，实现整车减阻5%。2020年，泛亚汽车技术中心有限公司秦鹏等<sup>[13]</sup>基于仿真分析方法，对某电动汽车底部后端区域进行减阻研究，通过增加后端挡板，优化底部后端流场分布情况，当挡板角度为30°、高度为-5 mm时，对整车空气阻力优化的贡献量最大，整车空气阻力系数降低了0.005。以上研究成果大多通过添加底盘空气动力附件达成整车空气阻力减小的效果，对整车轻量化、单车制造成本以及生产效率带来不利影响。此外，底盘设计对整车空气升力的影响鲜有报道。因此，需要对底盘空气动力性能优化开展综合研究，探索在不增加成本，且升力、阻力性能兼优的前提下的设计方案。

本文根据采用Realizable  $k-\varepsilon$ 与SST  $k-\omega$ 两种湍流模型对某SUV实车进行仿真和试验结果的对比，选取合适的湍流模型进行底盘空气动力优化仿真和

试验研究。通过增加前保险杠下部翻边高度以及对尾部消音器进行形状特征优化,在考虑整车制造成本、轻量化等因素的前提下,确保整车空气阻力减小的效果。同时,分别对添加前轮阻风板、副车架后部导流板、底盘中部导流板的方案以及综合底盘组合减阻方案进行仿真分析,并进行实车风洞试验以验证仿真结果,改善整车底部流场状态,优化尾部压力分布,有效降低整车空气阻力系数,对升力起到了显著的抑制作用,提升了该车型燃油经济性和行驶稳定性,为 SUV 底盘空气动力性能优化设计提供参考。

## 1 仿真策略与风洞试验设定

### 1.1 流体力学基本方程

流体流动遵循质量、动量和能量守恒定律,这些定律对应的表达式构成流体流动的基本方程<sup>[14]</sup>。

一般情况下,汽车外流场气体流动速度马赫数远小于 0.3,低于声速,通常可视为非定常不可压缩流体。由于汽车复杂的外造型特征导致车身气流出现分离现象,往往伴随着较强烈的湍流脉动,所以汽车外流场分析应按湍流场处理,其控制方程组为:

$$\begin{cases} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0, \\ \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u_i' u_j'} \right). \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $u_i'$  为脉动速度分量;  $\bar{u}_i$  为平均速度分量;  $p$  为压强;  $\rho$  为密度;  $\mu$  为动力粘性系数;  $\rho \overline{u_i' u_j'}$  即为雷诺应力项,需要添加相应湍流模型来封闭方程。

此外,由于整车外流场仿真计算一般认为流体为绝热状态,所以本文不考虑能量方程。

### 1.2 两方程湍流模型

汽车外部流动包括流体附着、局部分离、边界层转捩等流动现象,属于复杂的高雷诺数临地面钝体绕流范畴。为保证对旋转、分离等强三维流动特性的仿真精度,在两方程框架中, SST  $k-\omega$  湍流模型<sup>[15]</sup>与 Realizable  $k-\varepsilon$  湍流模型<sup>[16]</sup>常被引入到汽车

外流场的数值仿真分析中<sup>[17]</sup>。本文将通过风洞试验对比法,确定合适的湍流模型进行仿真计算。

### 1.3 仿真模型建立

本文研究对象为某款量产燃油 SUV 车型,去除乘员舱内部特征,保留外造型、发动机舱以及底盘等整车全细节结构,整车底盘结构如图 1 所示。

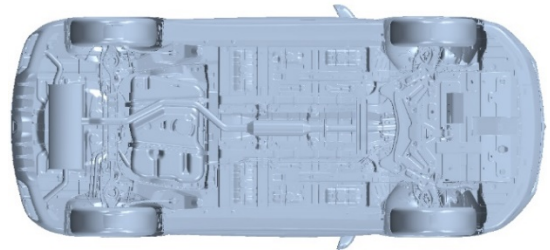


图 1 整车底盘结构

实车车身尺寸长宽高 ( $L \times W \times H$ ) 分别为 4 515 mm  $\times$  1 870 mm  $\times$  1 565 mm,正投影面积  $A = 2.45 \text{ m}^2$ 。设定计算域前端入口距离 SUV 车头 3 倍车长,出口距离 SUV 尾部 9 倍车长,上端距离 SUV 底部 9 倍车高,计算域宽度为 16 倍车宽,建立本次仿真分析计算域,如图 2 所示。计算阻塞比  $\varphi = A / (144WH) = 0.6\%$ ,满足阻塞比低于 5% 的基本要求<sup>[18]</sup>。

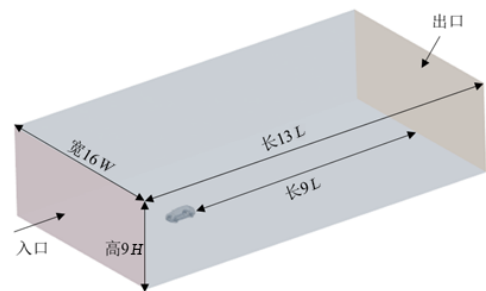
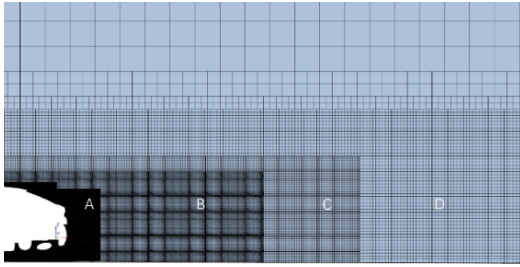


图 2 计算域设置

利用网格处理软件 ANSA,进行整车零部件分组命名和面网格划分,为保证重要局部流场区域的真实模拟,依据 T/CSAE 112—2019《乘用车空气动力学仿真技术规范》<sup>[19]</sup>对各零部件进行面网格划分,整车重构面网格数量约为 710 万个。

在基础模型进气格栅、A 柱、尾柱、后视镜、后保险杠、行李厢盖及底盘区域进行网格加密,提高整车体网格质量,保证仿真精确性,网格加密区如图 3 所示。参照《乘用车空气动力学仿真技术规

图3 网格加密区设置 ( $Y=0$  横截面)

范》设置 A、B、C、D 四个加密区的网格尺寸大小分别为 8、16、64、128 mm。体网格采用切割体划分，最终该 SUV 整车模型体网格数量为 5 000 万个左右。

#### 1.4 计算边界条件设置

本文模拟计算风速为  $U = 120$  km/h, 对应雷诺数  $Re = \rho UL / \mu = 9.6 \times 10^6$ , 其中  $\rho$  为空气密度取  $1.184 15$  kg/m<sup>3</sup>;  $\mu$  为空气动力黏度系数, 取  $1.855 08 \times 10^{-5}$  kg/(m·s);  $L$  为特征长度, 取车身长度 4.515 m。CFD 仿真计算模型边界条件设置见表 1。

表 1 边界条件设置

计算域边界名称	边界条件	设定值
计算域入口	速度入口/(km/h)	120
	湍流强度	0.01
	湍流尺度/mm	1
计算域出口	压力出口/Pa	0
	湍流强度	0.01
	湍流尺度/mm	1
模型表面、其他壁面	无滑移壁面	固定
地面	滑移地面速度/(km/h)	120

基于同一网格模型分别采用 Realizable  $k-\varepsilon$  和 SST  $k-\omega$  两种湍流模型计算迭代 6 000 步, 通过残差图和空气阻力系数图监测模型求解收敛情况。截取 5 500~6 000 步的平均阻力值作为空气阻力系数  $C_d$  的计算结果。

#### 1.5 整车风洞试验设定

风洞试验在整车空气动力性能开发中发挥着非常关键的作用<sup>[20]</sup>, 一方面可以与仿真计算结果互检互验, 另一方面, 风洞试验中的现场方案策略往

往对后续的设计优化提供重要思路。本文相关底盘空气动力性能优化方案在某整车气动-声学风洞进行实车试验验证。整车风洞坐标系如图 4 所示, 本文仿真计算结果也在此坐标系下讨论。

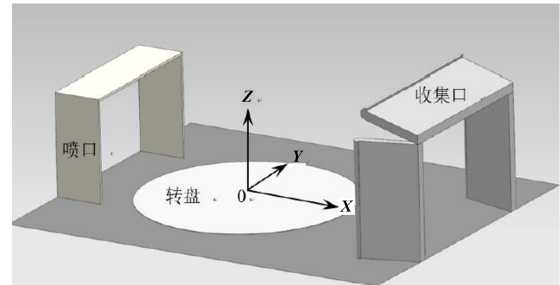


图4 整车风洞坐标系

该气动-声学风洞试验段长 18 m, 喷口面积 28 m<sup>2</sup>, 最高风速 250 km/h, 湍流度 < 0.2%, 在 140 km/h 风速下背景噪声小于 58 dB(A), 当边界层抽吸、切向吹气系统和中央移动带 (Center Belt, CB) 开启时, 空风洞天平转盘中心边界层厚度  $\delta_{99} < 12$  mm, 能很好地保证在天平中心处模拟汽车真实道路边界层状态, 空风洞边界层控制效果如图 5 所示, 图中  $U$  为近壁当地位置速度,  $U_\infty$  为自由来流速度。

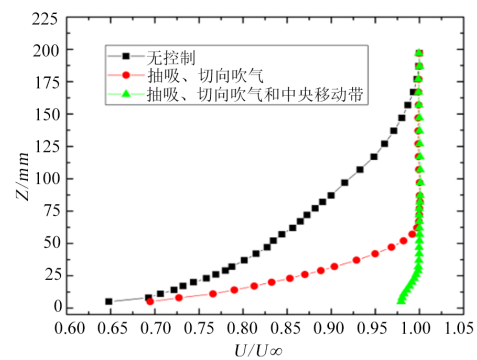
图5  $X=0$  (转盘中心) 处空风洞边界层速度型分布

图 6 为世界主要的汽车整车风洞轴向静压分布, 红色曲线代表本文试验风洞轴向静压分布参数。横坐标 0 代表风洞试验室天平正中心, 将该 SUV 车型放置于天平中心处即实车风洞试验位置, 该 SUV 整车全部位于风洞轴向静压稳定区域, 进一步保证了风洞测试结果的精确性和可重复性。试验风洞测力天平为 MTS 高精度测力天平系统, 气动测试精度  $\leq 0.03\%$  FS。

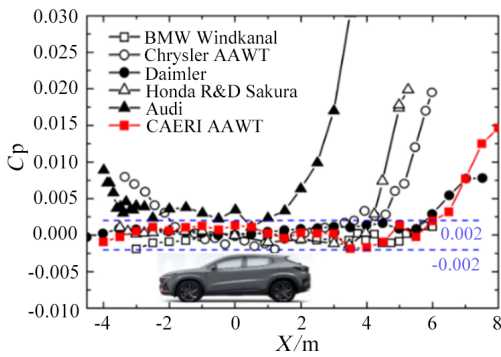


图6 世界汽车整车风洞轴向静压系数分布

试验车辆空调处于关闭、内循环状态，雨刮收起，保持进气格栅开启、冷却风扇静止、后视镜处于正常打开位置。试验车辆完成风洞试验安装后如图7所示。



图7 实车风洞试验

依据 T/CSAE 146—2020 《汽车整车空气动力学风洞试验——气动力风洞试验方法》<sup>[21]</sup>，在整车气动-声学风洞中进行该 SUV 车型气动试验测试，风洞试验设备状态见表2。

表2 风洞试验设备状态

序号	试验设备	状态
1	中央移动带	打开
2	车轮移动带	打开
3	切向吹气系统	打开
4	喷口边界层控制系统	打开
5	天平边界层控制系统	打开

## 2 湍流模型的确定及基础车型仿真

### 2.1 湍流模型的确定

通过对比基础车型在0偏航角和风速为120 km/h的工况下，整车风阻试验结果与CFD仿真结果，见

表3。本文以基础车型的风洞试验结果为基准，考虑车型保密性问题，将基础车型风洞实测空气阻力系数设为1。

表3 基础车型CFD仿真结果与试验结果对比

湍流计算模型	仿真计算结果	风洞试验结果	相对误差/%
Realizable $k-\varepsilon$	0.985	1	1.50
SST $k-\omega$	0.974		2.60

由表3可知，由于仿真模型补平了表面缝隙和孔洞，以及对模型边缘棱角圆滑过渡处理，使仿真结果均小于风洞测试值，但相对误差均在3%以内，能较好地模拟实车情况，满足工程需求。采用SST  $k-\omega$  湍流计算模型仿真计算结果与风洞试验结果相对误差为2.6%，相较于Realizable  $k-\varepsilon$  湍流模型误差较大。Realizable  $k-\varepsilon$  湍流模型对于旋转流动、强逆压梯度的边界层流动、流动分离和二次流有很好的表现，相关文献<sup>[5]</sup>也表明在计算资源有限的条件下，采用Realizable  $k-\varepsilon$  湍流模型得到升力仿真结果与试验结果最为接近。综合考虑到该模型后续将用于整车操稳性能仿真优化，所以选用Realizable  $k-\varepsilon$  湍流模型对该SUV车型进行底盘空气动力学性能优化设计。

### 2.2 基础车型仿真结果

根据表3的对比结果，最终选用Realizable  $k-\varepsilon$  湍流模型对该SUV基础车型进行整车空气动力学仿真计算，图8~11分别为该SUV基础车型压力系数云图、速度云图 ( $Y=0$ )、速度矢量图 ( $Y=0$ ) 和总压为0等势面的湍动能图。

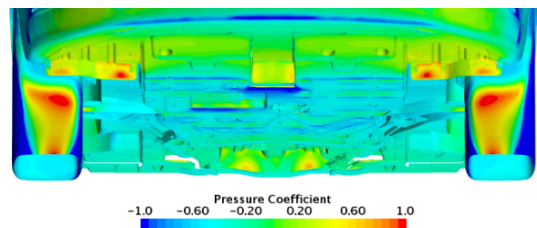


图8 底盘压力系数云图

由图8可知，该SUV车型前轮、前轮阻风板、发动机下护板等区域直接承受来流气体撞击零部件表面，形成底盘正压阻力，这是构成压差阻力的重

要因素。气流经过发动机下护板向后，在前轮之间区域形成较大范围负压区。由于前副车架区域空洞的存在，气流经历分离—附着—再分离过程，形成空洞区域局部旋涡和空洞后壁面的正压区。气流到达底盘后部时由于消音器高度和弧度变化导致气流在其附近加速，形成颜色较浅负压区，气流在消音器和后扰流器中间的缝隙形成旋涡，能量进一步耗散。

通过底盘压力系数云图分析可知，前轮阻风板、前副车架和尾部消音器区域气流分离较为严重，后续可在这些区域的附件上设计导流结构，引导气流合理地通过汽车底盘。

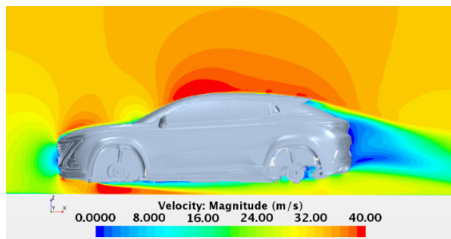


图9 整车中截面速度云图 ( $Y=0$ )

对整车流场速度分布进行分析，可捕捉气流流向和速度大小。基础车型中截面速度云图如图9所示，当气流冲击车身时，气流在车头处减速，形成前脸低速区，气流被迫沿着车身表面向后流动。当气流流经发动机盖后端和前挡风玻璃夹角处，由于气流受阻形成局部旋涡并减速，到达前挡风玻璃后缘时气流加速并形成较小的气流分离区，之后重新附着在驾驶室顶部并向后流动。气流在尾翼分离后与底盘来流在尾部汇合，在车尾形成两个很明显的尾涡，且越靠近涡心流速越低，如图10所示，该尾部涡系的存在不但造成了大量的能量耗散，还是形成压差阻力的重要原因。

汽车发动机下护板附近空气流速较快，一方面是气流在前保险杠分离后受到地面空间限制，另一方面是该SUV发动机下护板为引导气流的倾角设计较大，两者导致空气受到压缩而加速，在前轮中间区域流速较快，形成了对应图8中的前轮中间区域较大范围的负压区。

对基础车型的分析结果表明，为减少汽车阻

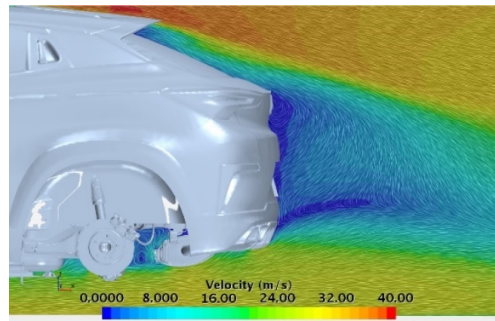


图10 尾部速度矢量图 ( $Y=0$ )

力，可通过引导气流合理地通过底盘，减小压差阻力；或减小尾部旋涡区域大小并控制涡心远离车尾，从而提升尾部压力恢复和减小尾部旋涡能量损失。

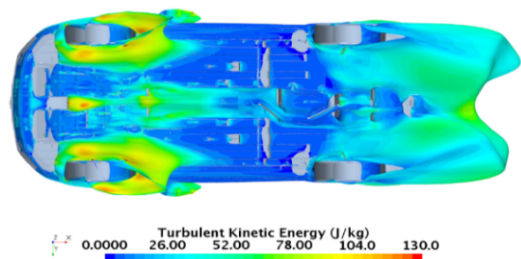


图11 总压为零等势面的湍动能图

湍动能面积大小代表湍流分离强度，由图11可知，前轮附近区域、前副车架以及尾部湍动能等值面较大，表明此处气流相互掺混作用剧烈并在该处产生涡旋，对整车空气动力性能影响明显。后续可从减少能量损耗角度出发，通过增加导流板等装置优化或消除图中高湍动能区域，则能有效减小整车空气阻力系数。

通过从压力云图、速度云图以及湍动能云图3个角度对整车基础模型进行分析，了解该SUV车型空气阻力的形成原因，为后续减阻优化方案提供了改进方向和理论依据。为了平滑汽车底部从而减少气流冲击、控制气流分离等，以及达到降低阻力的目的，本文提出了5种底盘空气阻力性能优化方案，并进行了风洞实车试验验证。

### 3 底盘空气阻力性能优化研究

#### 3.1 前保险杠下部阻风板

该SUV前轮挡板、发动机下护板区域处于一个较大的正压区，部分气流直接冲击零部件表面，

导致空气阻力增加。阻风板会产生类似“气坝”的效果，通过在车体前保险杠下方增加阻风板，可降低来流对底盘前部凸起零部件的冲击，并加速底盘空气流速，从而减小发动机下护板附近正压区域面积，从而减小整车空气阻力。

为更好地引导气流分离以及减小阻风板本身带来的正压阻力，设定阻风板与前保险杠下部呈  $135^\circ$  安装。设置阻风板长度只覆盖两前轮阻风板中间区域，其长度为 1 150 mm，如图 12 所示，图 12a 为阻风板局部图，图 12b 为阻风板中截面侧视图。

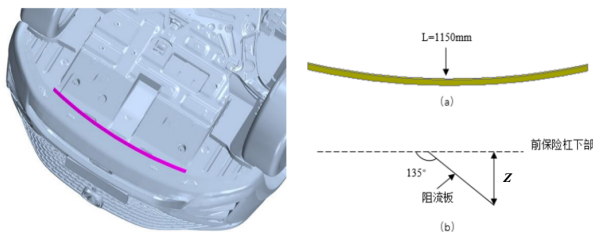


图 12 前保险杠下部阻风板方案对比图

阻风板高度过高将影响 SUV 的通过性，以最小离地间隙为参考将其最大高度设为 50 mm，考察阻风板 Z 向高度分别为 10、20、30、40、50 mm 时的减阻效果。仿真结果表明阻风板尺寸为 1 150 mm×20 mm 时减阻效果最佳，整车空气阻力系数降低 0.71%。

分别将不同尺寸阻风板进行风洞试验验证，风洞试验结果依旧表明阻风板尺寸为 1 150 mm×20 mm 时减阻效果最佳，整车空气阻力系数降低 0.54%，仿真和风洞试验结果见表 4，且当阻风板 Z 向高度大于 20 mm 后呈现空气阻力系数增加趋势。由于最优阻风板高度较低，在实际应用中，为降低整车制造成本，可通过增大前保险杠下部翻边高度达成该优化方案减阻效果。

表 4 前保险杠下部阻风板方案仿真及试验结果对比

方案	长度/mm	高度/mm	仿真 $\Delta C_D$	试验 $\Delta C_D$
1	1 150	10	0	0
2	1 150	20	-0.71%	-0.54%
3	1 150	30	0.50%	0.94%
4	1 150	40	1.29%	1.56%
5	1 150	50	1.61%	1.74%

前保险杠下部阻风板尺寸为 1 150 mm×20 mm 时整车中截面速度矢量图，如图 13 所示。由图可知，气流在阻风板前端进行分离，避免了大部分气流直接冲击发动机下护板前端，底盘空气动力性能得到改善，整车空气阻力系数降低。

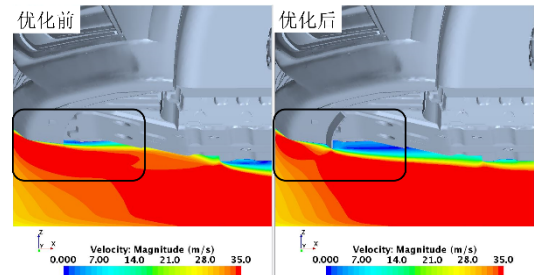


图 13 前保险杠下部阻风板优化方案速度云图对比 ( $Y=0$ )

### 3.2 前轮阻风板斜梯

汽车在行驶过程中，车轮处于高速旋转状态，此时车轮会带动一部分气流与前方来流在车轮的间隙通道中产生交汇与混合，造成轮胎附件气流湍流，从而影响底盘甚至整车的空气动力性能。轮胎阻风板能有效阻挡气流对车轮的直接冲击，并削弱车轮附近气流的紊乱程度。目前，已有众多学者通过研究轮胎阻风板位置、曲率半径、宽度及高度等因素来降低整车空气阻力系数，但阻风板自身也会产生正压力以及在阻风板两侧造成一定程度的气流分离。为了减小这种正压力以及更好地引导气流分离，在该 SUV 自带前轮阻风板上增加斜梯，如图 14 所示，该斜梯高度为 54 mm，长度分别为 216 mm 和 210 mm，宽度为 200 mm，斜梯与前保险杠相邻边圆滑过渡。

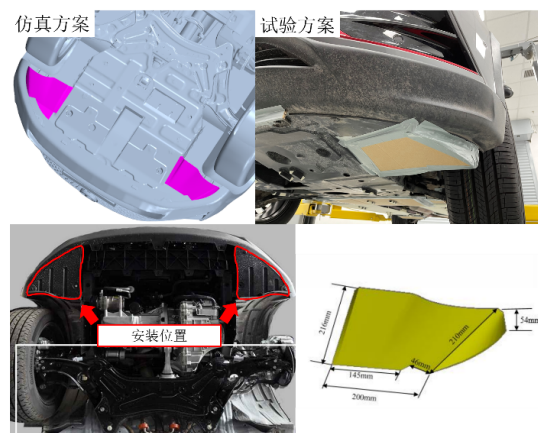


图 14 前轮阻风板斜梯方案

增加前轮阻风板斜梯后，通过垂直截面速度云图对比可知（图 15），该处气流在增加优化方案后流动分离明显变弱，仿真计算空气阻力系数降低 1.30%，且实车风洞试验减阻 1.09%，一致性高，是一种有效的轮胎前区减阻方案。

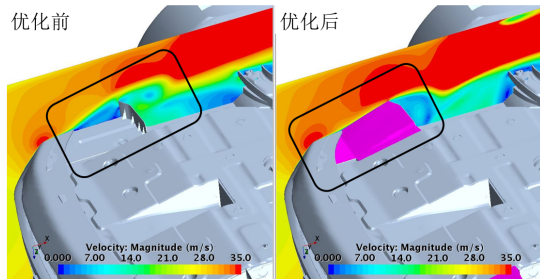


图 15 前轮阻风板斜梯垂直截面速度云图

### 3.3 副车架后部导流板

由于基础车型的底盘副车架后部位置处存在一个空洞，通过该处的气流较为紊乱，气流通过性较差，所以设计一款底部导流板，如图 16 所示，其宽度与底盘中部导流板宽度平齐，提升整车底盘平整度，达到减阻的目的。

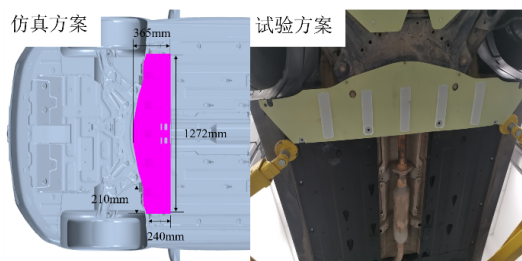


图 16 副车架后部导流板方案

由图 17 可知，增加副车架后部导流板后，前轮后部分离涡体积及能量大小减弱，副车架后部气流过渡平顺，流动分离减弱，对整车底盘气流分布有明显改善作用。CFD 仿真结果表明，整车空气阻力系数降低 1.49%。实车安装样件后风洞试验降阻 1.14%，仿真与试验结果一致性高。

### 3.4 底盘中部导流板

基础模型底盘中部存在地板结构件裸露的问题，该处气流紊乱，产生众多大小不一的涡旋，导致整车空气阻力性能恶化。在保证整车通过性的前提下，底盘平整化设计是解决底盘空气动力学问题

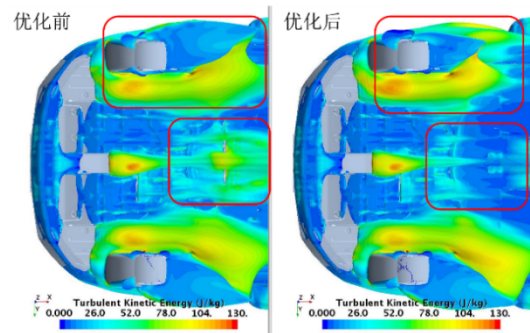


图 17 底盘湍动能

的重要途径，因此在底盘中部通过添加导流板进行气流引导，其结构如图 18 所示，导流板左右对称布置，长度和宽度分别为 1 210 mm 和 410 mm。通过优化底盘平整度，流经底盘的气流得到加速且由紊乱转为平顺，有效降低了底盘空气阻力，并控制了整车升力。

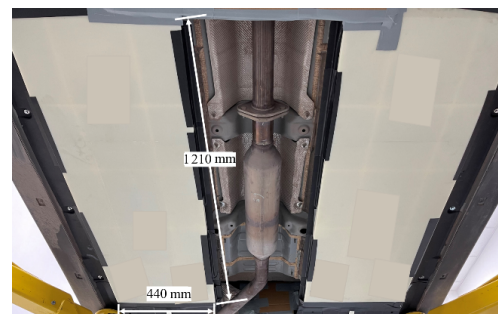


图 18 风洞试验增加底盘中部导流板

风洞试验表明，加装底盘中部导流板后，整车空气阻力系数降低 1.90%，整车升力减小 85.7 N。汽车在高速行驶时，整车升力降低，在转弯或者遭遇横风时可减少“失稳”和“发飘”等危险，有助于提高该 SUV 高速工况下的操纵稳定性。

### 3.5 尾部消音器形状优化

基础车型尾部消音器直接暴露在底盘空间，与尾部扩散器之间存在一定间隙，部分气流流经尾部消音器后因产生分离并直接冲击在空隙中而产生涡旋，对整车空气阻力性能不利，如图 21 左图所示。考虑到不改变消音器安装高度且不改变整车的离地高度，如果在此处设计大面积导流板将会导致整车制造成本的上升，增大整车整备质量。为避免成本和汽车质量的增加，仅对消音器尾部形状进行优化，延迟气流分离，优化后消音器外形如图 19 所

示, 其长、宽、高分别为 680 mm、130 mm、85 mm, 相临边圆角处理将消音器尾部由椭圆形改为方形, 其下表面与尾部消音器最低点平齐。相较于新增气动减阻附件, 该优化方案既能解决该处导流板安装布置的问题, 又能在达成减阻效果的前提下, 减少生产装配工序, 提高企业生产效率, 节约整车制造成本。

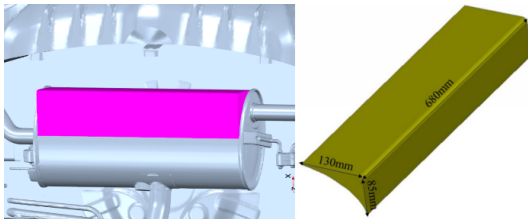


图 19 尾部消音器形状优化

由图 20 可知, 尾部消音器形状优化后, 其相邻尾部扩散器位置负压区明显减少, 从而减小整车压差阻力。图 21 中截面速度云图表明, 气流经过消音器后, 不再卷入消音器和扩散器间隙区, 可有效避免高速气流回卷冲击扩散器, 并使车底尾流分离涡远离车辆背部区域, 提升尾部背压<sup>[22]</sup>。该方案仿真结果表明整车空气阻力系数降低 4.08%; 实车安装样件后, 风洞试验整车空气阻力系数降低 2.99%, 降阻效果明显。

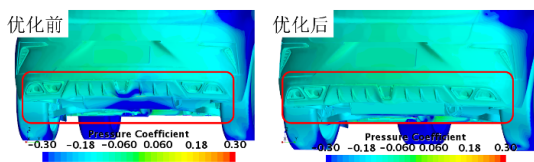


图 20 车尾压力系数对比

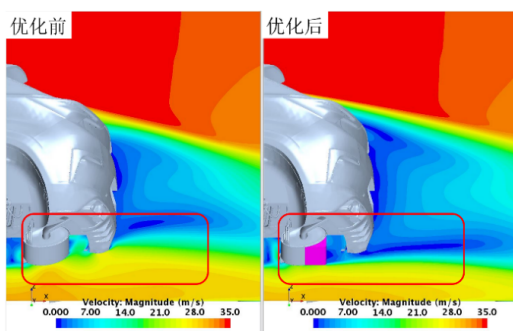


图 21 中截面速度云图 (Y=0)

### 3.6 组合优化方案

根据上述研究结果, 将 3.1~3.5 节共 5 个优化

方案进行组合, 并对其进行研究。实车试验组合方案如图 22 所示。

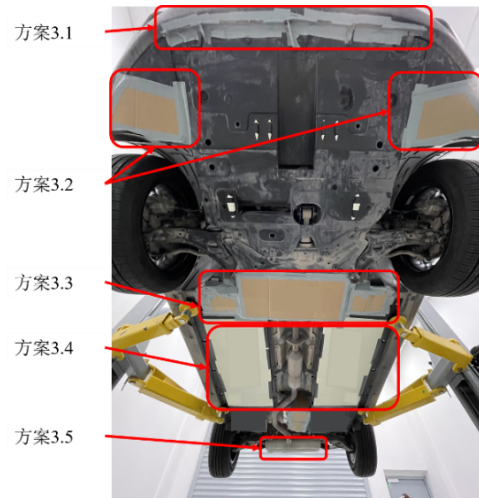


图 22 实车试验组合方案

所有方案的 CFD 仿真计算结果与实车风洞试验结果对比见表 5, 其组合方案风洞试验减阻率达到 5.16%, CFD 仿真结果与风洞试验结果一致性较好, 组合气动附件在提升整车风阻性能上效果显著, 且所有方案仿真减阻率与试验减阻率的差异均在 3% 以内。需要注意的是组合方案减阻效果不是单一优化方案的数值累加, 各减阻方案之间是相互耦合的。其中, 通过对尾部消音器进行形状优化, 可延迟气流分离, 且有助于汽车尾部压力恢复, 单一方案整车减阻效果最明显, 整车风洞试验减阻率达到 2.99%, 在整车底盘气动减阻设计上, 优化尾部消音器形状可以取得控制底盘气流和车体尾流的双重效果, 是底盘空气动力优化的热点区域。

表 5 减阻方案统计

序号	方案描述	仿真减阻率/%	试验减阻率/%
1	前保险杠下部阻风板	0.71	0.54
2	前轮阻风板斜梯	1.30	1.09
3	副车架后部导流板	1.49	1.14
4	底盘中部导流板	2.17	1.90
5	尾部消音器形状优化	4.08	2.99
6	组合方案	6.79	5.16

## 4 升力特性分析

流场变化与整车空气动力性能表现强相关, 添

加减阻优化方案虽能改善整车空气阻力性能，但也会影响整车升力特性。根据风洞试验数据，统计整车升力、升力系数（Lift Coefficient,  $C_L$ ）、前轴升

力系数（Front Lift Coefficient,  $C_{LF}$ ）以及后轴升力系数（Rear Lift Coefficient,  $C_{LR}$ ）4 个方面的测试结果，见表 6。

表 6 减阻方案对应的升力特性风洞测试结果

方案	升力/N	升力系数 $C_L$	前轴升力系数 $C_{LF}$	后轴升力系数 $C_{LR}$
基础车型	175.0	0.112 3	0.108 9	0.003 4
前保险杠下部阻风板	142.1	0.091 8	0.088 2	0.003 7
前轮阻风板斜梯	195.2	0.125 3	0.099 5	0.025 7
副车架后部导流板	174.2	0.111 9	0.107 7	0.004 1
底盘中部导流板	89.3	0.057 4	0.117 2	-0.059 8
尾部消音器形状优化	247.1	0.158 4	0.109 6	0.048 7
组合方案	138.0	0.088 7	0.091 1	-0.010 7

本文研究车型为前驱家用 SUV，后轴为非驱动轴，为避免高速行驶时出现“失稳”和“发飘”现象，可减小整车升力实现控制。同时，为保证后轴的抓地力以提升整车过弯稳定性，避免出现“甩尾”现象，应适当控制后轴升力，形成“前正后负”的前后轴升力分配。

组合方案相较于基础车型，整车升力降低 37 N，即升力系数降低 21%，前后轴升力系数均有不同程度降低，形成“前正后负”的前后轴升力分配，有利于提高整车行驶附着力，提升高速行驶气动稳定性，改善整车的升力特性。

组合优化方案车背总压为 0 的等势面分布图，如图 23 所示，由图可知，后保护散器处的流场明显得到改善，优化后整车尾涡较为对称，这对整车升力具有一定的抑制作用，也与风洞测试结果表现一致，即组合优化方案不仅对降低整车空气阻力具有重要作用，还对整车操纵稳定性的提升具有优化效果。

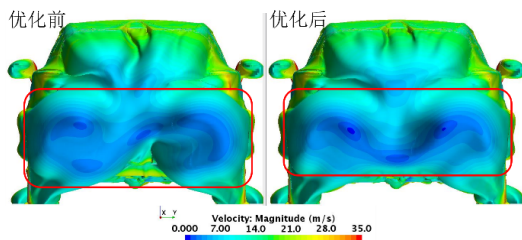


图 23 组合优化方案总压为零等势面（车尾区域）

此外，整车升力的降低主要来自前保险杠下部阻风板和底盘中部导流板的贡献，单一方案分别降

低整车升力 32.9 N 和 85.7 N，底盘中部导流板对整车前后轴升力系数均有改善。但是，前保险杠下部阻风板主要改善前轴升力系数，对后轴升力基本无影响，这与护板安装位置有关。

尾部消音器护板虽然减阻效果显著，但对后轴升力影响较大，后轴升力系数增加 0.045 3，同时导致整车升力增加 72.1 N，对整车升力特性有较大负面效果。在进行尾部消音器设计时，需考虑空气阻力和升力对整车空气动力性能的综合影响。

## 5 结论

本文以某款燃油 SUV 为研究对象，通过对整车底盘进行空气动力性能优化，降低整车空气阻力，并控制升力，采用雷诺时均法进行 120 km/h 高速工况整车外流场仿真分析，并在整车风洞中对优化方案进行验证，得出以下结论。

1) 在湍流模型选取上，SST  $k-\omega$  和 Realizable  $k-\varepsilon$  湍流模型均能较好地模拟计算整车空气阻力系数。对比仿真与试验结果，两种湍流模型仿真结果相对误差均在 3% 以内，但 Realizable  $k-\varepsilon$  湍流模型具有较好的收敛性以及精确性，且单一优化方案仿真结果与试验结果减阻趋势相当，本文采用 Realizable  $k-\varepsilon$  湍流模型进行减阻方案研究。这对其他类似 SUV 车型仿真湍流模型的选择具有借鉴意义。

2) 通过对尾部消音器形状优化, 延迟气流分离, 提升底盘尾部气流流畅性, 有助于汽车背部压力回升, 整车减阻效果显著, 单一方案整车风洞试验减阻率为2.99%。前保险杠下部阻风板、前轮挡板斜梯、副车架后部导流板、底盘中部护板均有不同程度的减阻效果。

3) 在基础车型空气动力性能本身较为优秀的基础上, 整车底盘优化组合方案风洞试验减阻率为5.16%, 且优化方案以不额外增加单车成本为目标

进行设计。通过对前保险杠、消音器等底盘部件进行形状优化以达成整车气动减阻效果, 对企业节约整车制造成本, 提高生产效率具有一定的参考意义。

4) 底盘导流板对该SUV升力性能影响显著, 底盘中部导流板可使整车升力降低85.7 N。整车组合方案风洞试验结果表明升力系数降低21%, 有助于减少汽车高速工况下“失稳”和“发飘”等危险现象发生, 提高操纵和行驶稳定性。

### 参考文献 (References)

- [1] 杜春英, 康献民, 游志伟, 等. 汽车底盘护板的空气动力特性探讨[J]. 汽车实用技术, 2013(10): 10-14.  
DU Chunying, KANG Xianmin, YOU Zhiwei, et al. The Aerodynamic Characteristic Discussion of Automobile Plate [J]. Automobile Applied Technology, 2013(10): 10-14. (in Chinese)
- [2] 刘学龙, 闫晓晓, 黄森仁. 汽车底部流场对气动阻力性能影响的研究[J]. 新型工业化, 2015, 5(3): 35-41.  
LIU Xuelong, YAN Xiaoxiao, HUANG Senren. Numerical Research on Influence of the Underbody Flow Structure of Automotive Aerodynamic Performance [J]. The Journal of New Industrialization, 2015, 5(3): 35-41. (in Chinese)
- [3] 杨易, 徐永康, 沈夏威, 等. 基于气动升力的汽车底部流场改进[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(10): 4063-4068.  
YANG Yi, XU Yongkang, SHEN Xiawei, et al. Improved Research of Automobile Underbody Flow Field Based on Aerodynamic Lift [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(10): 4063-4068. (in Chinese)
- [4] 袁志群, 杨明智, 张炳荣. 汽车底部复杂流场的主动和被动控制减阻方法研究[J]. 汽车工程, 2019, 41(5): 537-544, 555.  
YUAN Zhiqun, YANG Mingzhi, ZHANG Bingrong. A Study on Car Drag Reduction by Active and Passive Control of Complex Underbody Flow Field [J]. Automotive Engineering, 2019, 41(5): 537-544, 555. (in Chinese)
- [5] 宋昕, 谷正气, 何忆兵, 等. 基于Ahmed模型的气动升力研究[J]. 汽车工程, 2010, 32(10): 846-850.  
SONG Xin, GU Zhengqi, HE Yibing, et al. Research of Lift Force on an Ahmed Model [J]. Automotive Engineering, 2010, 32(10): 846-850. (in Chinese)
- [6] 孟妍妮, 戚宇欣. 后扰流板对轿车气动性能影响的数值模拟分析[J]. 车辆与动力技术, 2018(2): 51-55.  
MENG Yanni, QI Yuxin. Numerical Simulation of Effect of Rear Spoiler on Sedan Aerodynamics Characteristics [J]. Vehicle & Power Technology, 2018(2): 51-55. (in Chinese)
- [7] 徐鹏, 李春花, 刘鹏, 等. 某SUV车型底部气动附件的开发与研究[J]. 汽车技术, 2014(7): 14-17.  
XU Peng, LI Chunhua, LIU Peng, et al. Development and Research on Pneumatic Accessories on the Bottom of a SUV [J]. Automobile Technology, 2014(7): 14-17. (in Chinese)
- [8] 康宁, 丁浩. 车轮前阻风板对汽车风阻的影响[J]. 汽车技术, 2015(12): 29-33.  
KANG Ning, DING Hao. Influence of the Front-Wheel Spoiler on Aerodynamic Drag of Vehicle [J]. Automobile Technology, 2015(12): 29-33. (in Chinese)
- [9] 郭军朝, 史建鹏, 陈赣, 等. 某SUV车底气动附件的仿真与试验研究[J]. 汽车工程, 2016, 38(4): 511-514, 499.  
GUO Junchao, SHI Jianpeng, CHEN Gan, et al. Simulation and Experimental Study on the Aerodynamic Accessories on the Underbody of a SUV [J]. Automotive Engineering, 2016, 38(4): 511-514, 499. (in Chinese)
- [10] 黄珊, 王靖宇, 胡兴军, 等. 基于近似优化方法的CAS轿车底盘气动特性优化设计[C]//第十四届全国水动力学学术会议暨第二十八届全国水动力学研讨会论文集. 北京: 中国海洋出版社, 2017: 799.  
HUANG Shan, WANG Jingyu, HU Xingjun, et al. Optimization of Pneumatic Characteristics of CAS Car Chassis Based on Approximate Optimization [C]//Proceedings of the 14th National Hydrodynamics Academic Conference and the 28th National Hydrodynamics Seminar. Beijing: China Ocean Press, 2017: 799 (in Chinese)
- [11] CHALIGNÉ S, TURNER R, GAYLARD A. The Aerody-

- namics Development of the New Land Rover Discovery [C]//Proceedings of the 11th FKFS Conference: Progress in Vehicle Aerodynamics and Thermal Management, Springer, Cham, Dec. 5, 2017.
- [12] THOMAS W. The Aerodynamic Development of the New Porsche Cayenne [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2020, 234(2-3): 390-408.
- [13] 秦鹏, 党岩, 陈功. 某电动车底部后端的降阻研究[J]. 上海汽车, 2020(4): 4-8, 15.  
QIN Peng, DANG Yan, CHEN Gong. Aerodynamic Drag Reduction Study on Rear Underbody Parts of a BEV Vehicle [J]. Shanghai Auto, 2020(4): 4-8, 15. (in Chinese)
- [14] 蒋丽. 基于CFD的中型SUV气动减阻研究[D]. 长春: 吉林大学, 2019.  
JIANG Li. Research on Low Aero-Drag Design of Mid-sized SUV Based on CFD[D]. Changchun: Jilin University, 2019. (in Chinese)
- [15] MENTER F R. Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications [J]. AIAA Journal, 1994, 32(8): 1598-1605.
- [16] 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 & Fluids, 1995, 24(3): 227-238.
- [17] 朱晖, 杨志刚. 两方程模型计算轿车气动性能的适用性研究[J]. 汽车工程, 2016, 38(11): 1283-1287, 1337.  
ZHU Hui, YANG Zhigang. A Study on the Applicability of Two-Equation Models to the Calculation of Aerodynamic Performance of Sedan [J]. Automotive Engineering, 2016, 38(11): 1283-1287, 1337. (in Chinese)
- [18] 支询, 李施, 刘源, 等. 风洞阻塞比系数试验与研究[J]. 计测技术, 2017, 37(S1): 356-358.  
ZHI Xun, LI Shi, LIU Yuan, et al. Test and Research on Blockage Ratio Coefficient of Wind Tunnel [J]. Metrology & Measurement Technology, 2017, 37(S1): 356-358. (in Chinese)
- [19] 中国汽车工程学会. 乘用车空气动力学仿真技术规范: T/CSAE 112—2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.  
China SAE. Technical Specification of Passenger Car Aerodynamic Numerical Simulation: T/CSAE 112—2019 [S]. Beijing: China Standard Press, 2019. (in Chinese)
- [20] 王铁城, 吴志成, 肖人熙, 等. 空气动力学试验技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.  
WANG Tiecheng, WU Zhicheng, XIAO Renxi, et al. Aerodynamic Test Technology [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1995. (in Chinese)
- [21] 中国汽车工程学会. 汽车整车空气动力学风洞试验——气动力风洞试验方法: T/CSAE 146—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.  
China SAE. Full Scale Automotive Aerodynamic Wind Tunnel Test—The Method of Automotive Aerodynamic Performance Test: T/CSAE 146—2020 [S]. Beijing: China Standard Press, 2020. (in Chinese)
- [22] HUCHO. Aerodynamics of Road Vehicles [M]. Warrendale: Society of Automotive Engineers, 1998.

## 作者简介



王庆洋 (1988-), 男, 黑龙江七台河人, 博士, 工程师, 主要研究方向为汽车空气动力学、钝体绕流、风洞试验技术。

Tel: 15811043159

E-mail: wangqingyang@caeri.com.cn