

某高端轿车综合空气动力学性能开发

周 炜, 王 松, 姜祖啸

(上汽大众汽车有限公司, 上海 201805)

摘要: 针对某高端运动型轿车进行包括风阻、升力和风噪等内容的综合空气动力学性能研究与产品优化。以半油泥材料全尺寸模型及其 1:1 数模为研究对象, 采用整车风洞试验与数值模拟仿真相结合的技术方法, 对该车型的外形面、底部护板、轮毂及密封条等进行空气动力学研究, 获得了风阻系数值为 0.269, 且行驶稳定性与风噪水平都有大幅提升的最终优化车型。此外, 介绍了开发过程中获得的具体工程经验与相关理论支撑。

关键词: 轿车造型; 空气动力学; 风洞试验; 计算流体力学; 升力系数

中图分类号: U467.1

文献标志码: A

Integrated Aerodynamic Development of a Luxury Sedan

ZHOU Wei, WANG Song, JIANG Zuxiao

(SAIC Volkswagen Automotive Co., Ltd., Shanghai 201805, China)

Abstract: Integrated aerodynamic performance of a luxury sports sedan, including aerodynamic resistance, lift force, and wind noise, was studied and optimized. Taking a clay-rigid material mixed full-scale model and its 1:1 digital model as main research objects, an in-depth, full-scale wind tunnel test and numerical simulation were conducted on shape surface, bottom guard plate, aerodynamic hub and sealing strip of the vehicle. A wind resistance coefficient of 0.269, a greatly optimized driving stability, and wind noise level were obtained. This paper introduces the specific engineering experience and relevant theoretical support obtained in the development process.

Key words: vehicle engineering; aerodynamics; wind tunnel test; computational fluid dynamics; lift coefficient

理和水管理等范畴。随着全球轻型车测试规程(WLTP)^[1]等更为严苛的测试标准在国际上实施, 汽车工业界和学术界对影响油耗和排放的风阻问题日渐重视。高端车型设计时速可达 250 km/h, 除了风阻之外, 更关心影响操纵稳定性的升力系数^[2]以及与乘坐舒适性密切相关的风噪性能^[3]。而汽车空气动力学范围内的各项性能在很多情况下此消彼长, 因此必须综合考虑, 全局优化^[4-5]。

近年来, 随着汽车风洞技术的发展, 地面模拟车辆空气动力环境成为标配^[6], 其试验测量精度逐步提高, 可获得数据不断增加; 同时计算流体力学(CFD)技术取得了极大的发展, 高性能计算集群的出现使得计算效率大幅提高, 除主流商业软件外其他开发工具的功能也不断完善, 开源软件如 OpenFOAM^[7]提供了更开放、自由度更高的平台。在试验和 CFD 开发的共同的加持下, 汽车空气动力学研究的目标不断细化, 从传统的车身造型发展至动力总成、轮毂造型^[8]、胎皮造型等更为精细的研究。国内外涌现出大批优秀设计方案, 例如主动格栅^[9]、可变尾翼、侧气帘、扩散器等空气动力学套件, 上市了一系列优秀的低风阻车型^[10]。

本文针对某高端轿车进行包括风阻、升力和风噪的综合空气动力学性能优化, 以等比例半油泥模型样车风洞试验和 CFD 仿真为技术手段, 通过对后盖、底盘和轮毂等研究, 在保证该车型气动升力和风噪水平的条件下, 同步优化风阻系数。同时, 在开发过程中, 总结了大量空气动力学综合开发经验。

1 研究概况

1.1 研究对象

研究车型为上汽大众投产的某高端运动轿车, 通过 MLB C 级车底盘平台打造, 上汽大众对此车型

广义的汽车空气动力学涵盖气动力、风噪、热管

收稿日期: 2022-11-20

第一作者: 周炜(1974—), 男, 高级工程师, 工学博士, 主要研究方向为汽车整车工程。E-mail: ZhouWei@CSVW.COM

通信作者: 姜祖啸(1984—), 男, 工程师, 工学硕士, 主要研究方向为汽车空气动力学。E-mail: JiangZuxiao@CSVW.COM

整体进行延长,车长和轴距分别由 4 976 mm、2 928 mm 延长至 5 076 mm、3 026 mm,且从掀背式后车尾改为更符合国内需求的三厢车布局。由于造型更改主要发生在后半车身,故在油泥模型车设计阶段,保留基础车型的前车身并将后半车身造型通过油泥造型来实现。

通过该设计方案可以充分利用基础车型车身骨架,大幅缩短样车加工改造周期。由此形成的半油泥混合样车如图 1 所示。其车身外造型部分由油泥拼接铣削而成,得益于高精度的造型加工设备,模型车外造型整体加工误差为 ± 0.5 mm;其他动力总成、冷却模块、底部护板均采用实车零件;前后保险杠、门把手等零件采用 ABS 塑料快速成型件,可以快速根据造型方案加工和替换。在后期车身造型锁定后,也使用对应造型的试制实车进行测试。半油泥样车与实车气动测试结果差别在 0.002 以内。



图 1 研究对象与风洞试验现场

Fig.1 Research object and wind tunnel test site

1.2 风洞试验

气动声学风洞主要用于测试整车的气动性能,以及整车的噪声控制研究。风洞配备有六分量气动天平,主要用于测量阻力、侧向力、升力以及滚转、俯仰和横摆力矩;五带移动系统可以较为真实地模拟汽车实际运行状态中车底的路面状态。在本文中,整车风洞试验有两项作用:①对仿真结果进行验证,通过对比六分量力以及表面压力,对数值仿真的结果进行验证与修正;②直接用不同方案测试结果对方案进行优化设计,测试内容包括阻力、升力和风噪等。测力试验所使用天平的精度为 0.05%,采样频率 1.0 Hz,采样 30 s 取平均。

风洞试验在同济大学上海地面交通工具风洞中心的整车气动风洞(AAWT)中进行,同时在德国奥迪风洞也同步进行了部分验证与开发试验。整个车

型项目开发过程中总共花费了超过 500 h 的风洞试验时长,其中国内试验部分超过 270 h。

根据国内的驾乘需求,在空气动力学开发过程中采用标准的 3 人载荷加载方式来模拟真实路面行驶的车辆状态,行驶速度采用 140 km/h,偏转角为 $0^\circ \sim \pm 10^\circ$ 。因带偏转角工况结果趋势基本与零偏航一致,后续仅给出不带偏航角的结果。

1.3 数值仿真

数值仿真可在无样件的情况下获得优化方案的效果,同时详细的流场细节也可帮助分析结果的产生原因,指导进一步的改进方向,因此也是车型空气动力学开发中与试验互补、不可或缺的技术手段。奥迪和上汽大众的研发团队基于开源 OpenFOAM 软件做了大量研究,并以此作为主要 CFD 开发工具。

本文采用与实车 1:1 的整车进行 CFD 仿真研究。该模型具有完整的发动机舱内部结构,并设置多孔介质区域来代替冷却模块。车身离地高度、轮心离地高度和胎皮压缩量在试验加载下测量得到。为了真实还原道路测量的真实工况,本文采用了基于车身尺寸的自适应计算域设置,整个计算域长度为 20 倍车长、宽度为 5 倍车长,高度为 3 倍车长,计算域入口和车头之间的距离为 5 倍车长,并根据实际风洞参数,在地面处通过滑移网格设置 5 带模拟系统,车轮通过旋转网格模拟转动。

仿真计算全部使用开源 CFD 软件 OpenFOAM 完成。其中:计算域体网格划分使用 SnappyHexMesh 网格工具,在车身附近区域进行体网格加密处理,获得的网格见图 2;整车表面设置边界层,控制 y^+ 在 30~100;考虑到网格无关性原则以及计算效率,最终整体网格量约为 7 200 万。

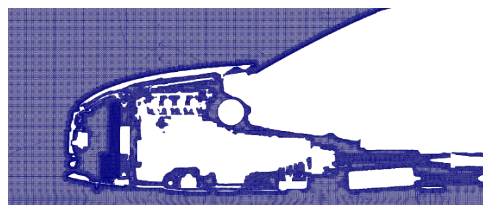


图 2 仿真模型局部网格划分

Fig.2 Local mesh division of simulation models

对于气动力仿真,采用雷诺时均(RANS)方法稳态仿真,针对车身表面复杂的分离流动,选择能得到更好的模拟效果的 $k-\omega$ SST 湍流模型。边界条件设置为:入口设置为速度入口、出口设置为压力出口、车身和地面设置为壁面、其他自由面设置为对称

面,具体数值根据实际风洞试验工况设置。选择不可压稳态 SimpleFoam 求解器,使用二阶迎风格式。收敛标准为风阻值稳定即波动小于 0.002、各项残差值低于 10^{-5} 且至少迭代 5 000 步,取最后 1 000 步的平均值作为最终结果。

本文风洞试验与数值仿真的结果经过多次相互验证,对比结果均在可接受范围之内。如图 3 为项目初期用于验证 CFD 方法可靠的而进行的对标试验,给出了车身中截面压力系数 C_p 分布的仿真与实测结果。结果显示,仿真与实测的结果整体趋势非常接近,单个点的相对误差最大不超过 5%,有效证明了仿真的精度。

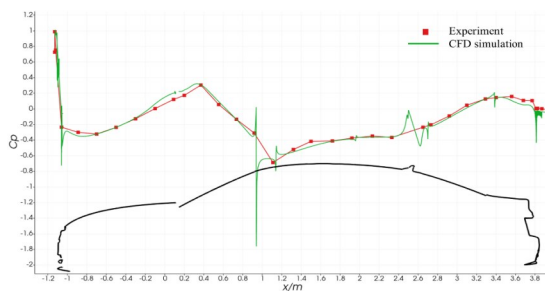


图 3 车身中截面压力系数 C_p 分布

Fig.3 Distribution of pressure coefficient C_p in the cross-section of the sedan body

2 风阻与升力综合优化

由于目标车型定位于高端性能轿车,在保证风阻优化的同时,更关注气动升力对操控性能的影响。因此在整个开发过程中,风阻和升力是综合优化、同步进行的。

2.1 后盖优化

汽车后盖造型影响尾部气流分离,对空气动力学性能有重要影响,对此进行局部优化能获得显著的效果。本文尝试通过调整后盖造型,获得满意的综合气动性能结果。图 4 展示了原始造型以及变形优化方案的车尾区域中截面,优化方案主要是将后盖末端特征线抬升形成鸭尾布局,抬升高度分别为 5 mm、10 mm 和 15 mm。

风洞试验与仿真结果如图 5 所示。由图可以发现:抬升高度为 5 mm 时,空气阻力系数 C_d 基本不变;而抬升高度超过 5 mm 时, C_d 会出现较大增长;同时抬升高度在 5~15 mm 范围内增加会使后升力系数 C_{lr} 持续降低。原始设计方案后盖末端特征线处气流分离后尾部压力恢复较好,因而风阻较低,但后盖

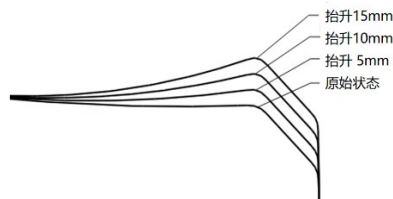


图 4 后车盖优化方案

Fig.4 Optimization plan for rear hood

压力较低导致后升力系数增大,会影响高速下后车身稳定性。综合考虑,将抬升高度方案确定为 5 mm,在优化 C_d 同时,进一步降低后升力。如需进一步降低升力,则可继续抬高后盖末端特征线。

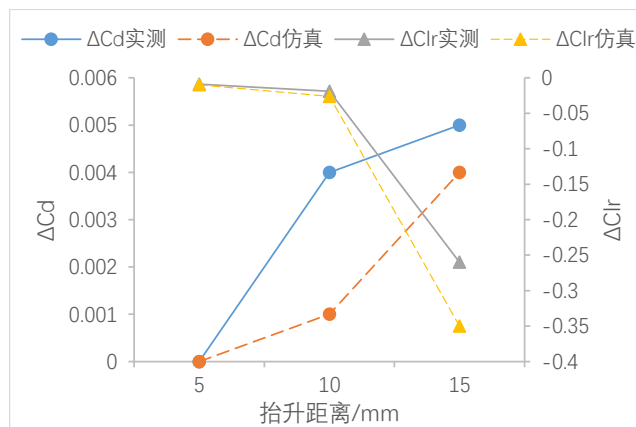


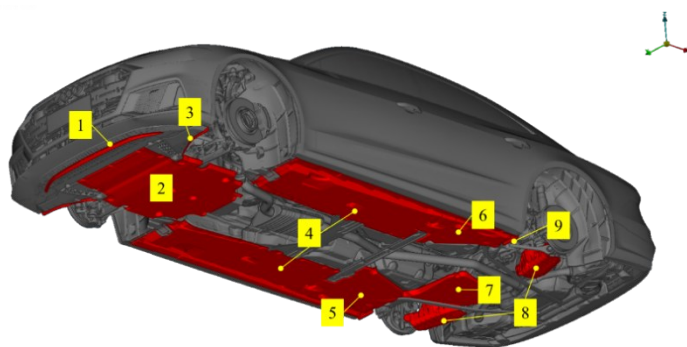
图 5 后盖抬升高度与阻力系数 C_d 、升力系数 C_{lr} 的变化关系
Fig.5 Relationship between lifting height of rear hood and changes in drag coefficient C_d and lift coefficient C_{lr}

2.2 底部扰流器与护板

底部护板对于保护车辆底盘、降低风阻系数和优化整车升力起重要作用。图 6 为本文中所采取的底部护板方案,其中 1、3、9 为凸出形扰流板,通过使气流提前分离来降低后方气流的扰动,从而优化空气动力学性能。其他部件为与车辆行驶方向平行的护板,通过覆盖底盘不平整件起到整流作用。

由于底部护板方案较多,仅以一个方案为例介绍。图 7 展示了前扰流板安装前后的静压分布对比。结果显示,安装扰流板后,气流在其前方产生滞止,后方明显分离并产生一个负压区,此方案虽对风阻系数略有影响,但能大幅降低前轴升力。

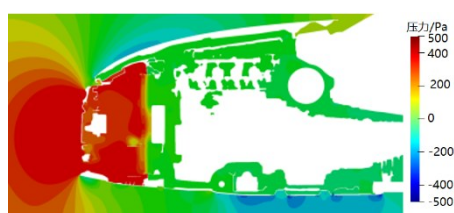
为得出最佳方案,取前扰流板高度为 0 mm、30 mm、40 mm、50 mm 和 60 mm 进行风洞试验和仿真分析。试验结果见图 8,其中前轴升力系数 Cl_f 随扰流板高度增加而不断降低,同阻力系数时 C_d 升高约



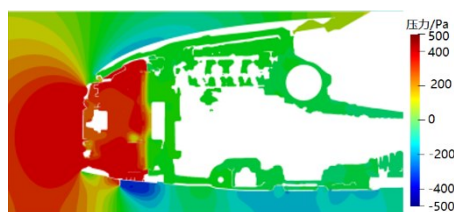
1. 前扰流板 2. 发动机底护板 3. 前轮扰流板 4. 中央通道侧护板 5. 油箱右护板 6. 油箱左护板 7. 后轴护板 8. 后悬架护板 9. 后轮扰流板。

图 6 底部护板布置方案

Fig.6 Layout plan for bottom protective plate



(a) 无前扰流板



(b) 增加前扰流板

图 7 扰流板对车头中截面静压分布的影响

Fig.7 Influence of spoilers on static pressure distribution of the cross-section in the front of the sedan

0.002~0.003。最终,考虑到车身离地间隙、Cd 值降低等因素,选择前扰流板 30 mm 方案。此方案虽然使阻力系数 Cd 增加 0.002,但前轴升力系数 Clf 降低了 0.02。通过类似手段得到各个部护板的最终优化方案试验测试结果如图 9 所示。通过合理的底部护板布置,使阻力系数 Cd 总体降低了 0.013,升力系数 Cl 总体降低了 0.076。

2.3 空气动力学轮毂

空气动力学轮毂对改善整车空气动力学性能起到重要作用^[7],以下对此部分的研究和开发进行介绍。研究使用了一个可调整轮辋造型的基础轮毂样件,该样件包括一个 19 吋的 5 辐轮毂骨架以及对应的造型盖板,如图 10 所示。通过更换盖板,可快速变更轮毂造型。

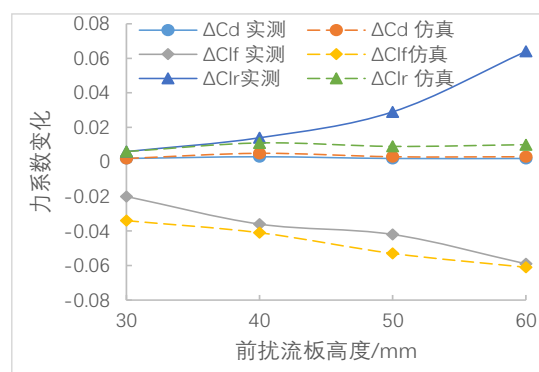


图 8 不同前扰流板高度对气动系数影响

Fig.8 Influence of different front spoiler heights on aerodynamic coefficients

首先对开孔率进行研究。实测不同轮毂开孔率对风阻系数的影响,如图 11 所示。由图可见,风阻系数随着开孔率的变大不断增长,也就是说风阻系数与轮毂开孔率是正相关的。但由于为造型美观以及刹车盘冷却等原因,轮毂不宜设计为全封闭式,需保持在 20% 以上的开孔率。综合对风阻系数的影响,将开孔率控制在 30% 左右时,对风阻的影响较小,因此本文的空气动力学轮毂开孔率定在 20%~35% 之间。

在确定开孔率之后,可作为空气动力学轮毂的设计依据。图 12 展示了该车型所有的轮毂设计方案及其开孔率,图 13 为不同造型轮毂下整车的风阻与升力系数。整体来看轮辋开孔率下降,整车风阻系数下降而升力系数上升,也和具体的造型密切相关。其中,20% 开孔率的造型相比于轮毂全封状态风阻值仅增加了 0.004,因此可以实现低风阻目标。而高开孔率的运动轮毂虽有较高的阻力系数但升力系数较低,从而有利于提高车辆的行驶稳定性,因此在选择轮毂造型时应综合考虑。

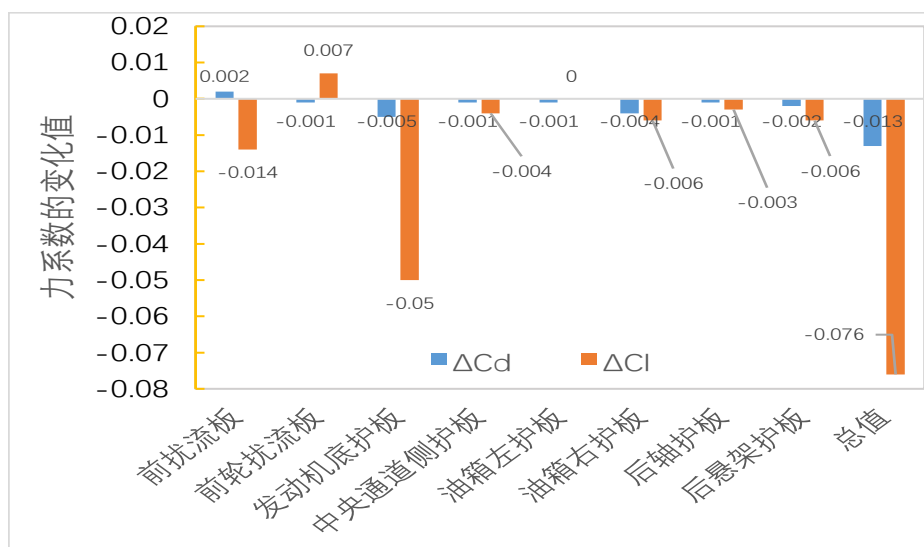


图 9 各底护板对阻力系数和升力系数的影响

Fig.9 Influence of each bottom protective plate on the resistance coefficient and lift coefficient

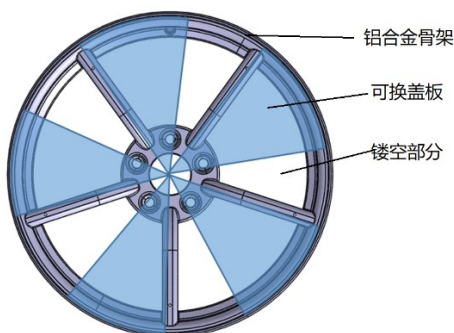


图 10 基础轮毂开孔率研究样件

Fig.10 Basic wheel hub opening rate research sample

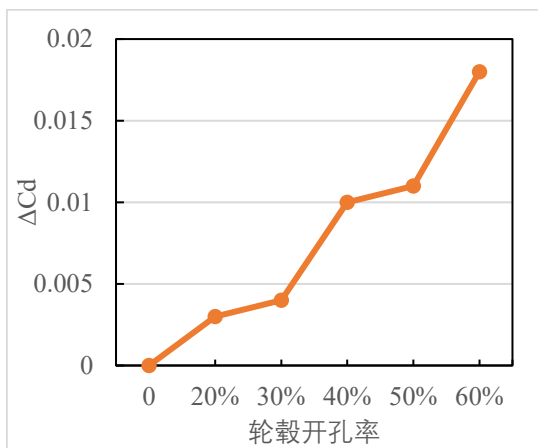


图 11 风阻值随轮毂开孔率的变化

Fig.11 Variation of wind resistance with hub opening rate

2.4 气动综合优化历程

在开发过程中,对不同阶段的试验样车进行了空气动力学性能的验证。图 14 展示了不同开发阶

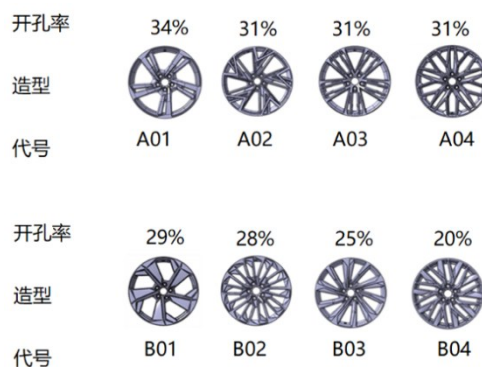


图 12 各种实车轮毂造型方案

Fig.12 Different wheel hub design schemes for actual sedans

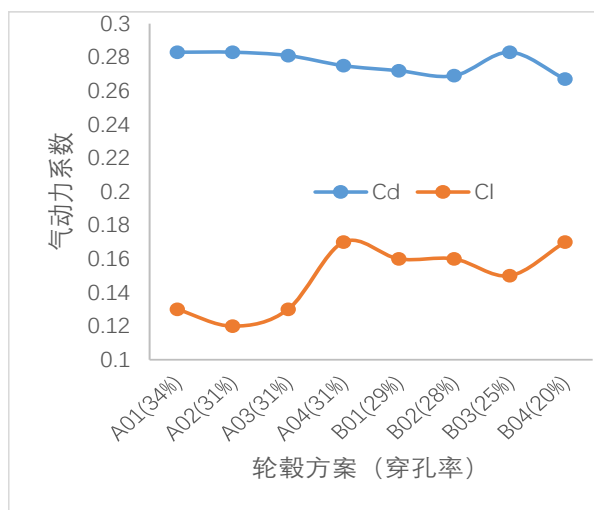


图 13 不同造型轮毂下整车的风阻与升力系数

Fig.13 Wind resistance and lift coefficient of entire sedan of different shaped wheel hubs

段的风阻系数和升力系数变化过程,其中D1—D5为油泥造型设计阶段,P1—P3为实车部件优化验证阶段。由图可见,D1阶段油泥模型车实测风阻系数为0.287,升力系数为0.202;经过7轮优化,两者均稳步下降,风阻系数下降0.018至0.267,升力系数下降0.083至0.119。尤其是升力系数下降了40%,这对高速行驶稳定性贡献巨大。

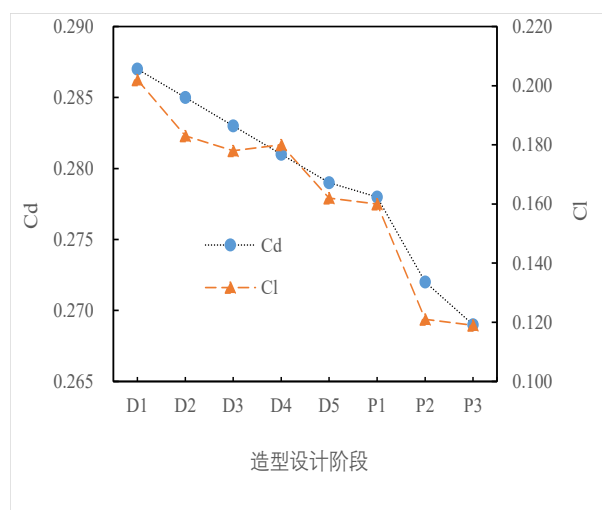


图14 不同阶段 C_d 和 C_l 变化

Fig.14 Changes in C_d and C_l at different stages

3 气动与风噪综合优化

一般情况下,前盖密封条能防止气流从机盖缝隙进入发动机舱,从而同时降低风阻和风噪。但在本文项目开发过程中,发现在时速为230~250 km/h的工况下,机盖位置会产生明显的低频抖动噪声,此噪声强度较大,对噪声品质影响较大,其主驾驶外耳测试结果如图15曲线所示。

经过反复试验与仿真分析,发现高频噪声产生的原因是密封条在气动压力下失效产生的。图14a为前盖全密封时车身表面压力的分布,可见在前盖密封两侧出现了大幅的压力差,缝隙下方压力大而上沿处压力较小。如图16(b)所示,由于内部压力小于外部压力,密封条处会产生较大的压差,当压力差达到一定值,密封条产生间歇性的失效,而密封条的抖动产生幅值较高的低频噪声。为了解决此问题,将前盖中间位置的密封条进行优化,即把图16(a)方框中的密封条取消;后进行了实车风洞试验验证(图15中的黑色曲线)显示,此处峰值消除,风噪性能显著改善;同时风阻系数上升0.001以内,性能基本保持不变。因此,合理布置前盖处的密封条对降低风

阻和风噪水平有重要意义。

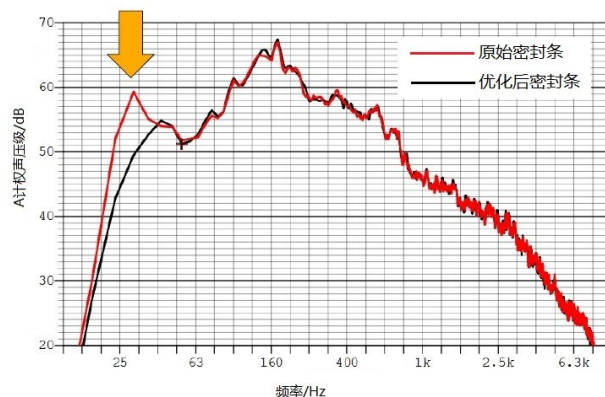
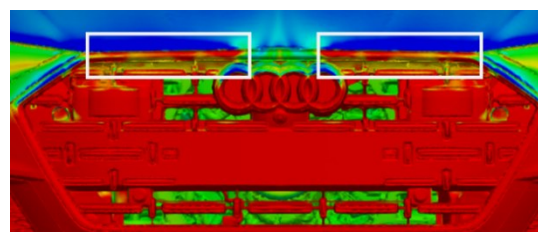
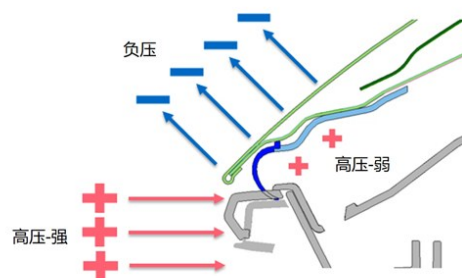


图15 车内噪声A计权频谱

Fig.15 Weighted spectrum of interior noise A of sedan



(a) 表面压力系数分布示意



(b) 前盖密封失效原理

图16 前盖密封失效的产生原因

Fig.16 Reasons for failure of front hood sealing

4 结论

本文对某全新轿跑车型在车身整体延长的基础上,通过数值仿真、油泥模型车风洞试验等技术手段,在保证高端运动车型更关注的升力及风噪等性能的前提下,进一步降低风阻。最终状态的风阻系数为0.269,较之基础车型的风阻系数降低0.018,升力系数下降40%以上,因此获得了极佳的综合空气动力学性能。开发过程中,通过大量试验数据与仿真结果对标,验证了两者的准确性与可靠性。仿真与试验结合,使得仿真能够指导试验的改进方向,并积累了大量的工程经验。具体结论主要如下:

(1) 适当抬升后盖高度,可减小后盖表面气流速度,提升后盖压力,进而明显降低后升力系数;

(2) 在车底设置扰流板,使底部气流提前分离,并在扰流板后方产生明显的负压区域,可有效降低升力系数;平面底护板整理底部气流,可降低阻力和升力系数;

(3) 轮毂开孔率与阻力正相关,与升力负相关,将开孔率控制在 20%~30%,可以实现风阻和升力水平平衡;

(4) 通过优化或取消在压力梯度和壁面剪切应力梯度较小位置的密封,可以在基本不影响气动性能的基础上避免密封条抖动产生额外气动噪声的风险,以做到两种性能的综合优化。

参考文献:

- [1] DEMUYNCK J, BOSTEELS D, PAEPE M D, *et al.* Recommendations for the new WLTP cycle based on an analysis of vehicle emission measurements on NEDC and CADC[J]. *Energy Policy*, 2012, 49(10):234.
- [2] KANDASAMY S, DUNCAN B, GAU H, *et al.* Aerodynamic performance assessment of BMW validation models using computational fluid dynamics [C]// SAE 2012 World Congress & Exhibition. SAE Technical Paper, 2012-01-0297.
- [3] 潘作峰,邓玉伟,郝耀东,等. 动态密封状态下汽车风噪性能不确定性研究[J]. *汽车工程*, 2021, 43(11):9.
PAN Zuofeng, DENG Yuwei, HAO Yaodong, *et al.* Study on uncertainty of vehicle wind noise performance under dynamic seal condition[J]. *Automotive Engineering*, 2021, 43(11):9.
- [4] 王清,招启军. 基于遗传算法的旋翼翼型综合气动优化设计[J]. *航空动力学报*, 2016, 31(6):1486.
WANG Qing, ZHAO Qijun. Synthetical optimization design of rotor airfoil by genetic algorithm [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2016, 31(6): 1486.
- [5] ZHANG L, DAI Z Y, TIAN L I, *et al.* Multi-objective aerodynamic shape optimization of a streamlined high-speed train using Kriging model [J]. *Journal of Zhejiang University (English Edition) Part a: Applied Physics and engineering*, 2022, 23(3):18.
- [6] MACK S, INDINGER T, ADAMS N A, *et al.* The ground simulation upgrade of the large wind tunnel at the Technische Universitt München [C]//SAE 2012 World Congress & Exhibition. SAE Technical Paper. 2012-01-0299.
- [7] ALONAZI A, KEYES D, LASTOVETSKY A, *et al.* Design and optimization of openfoam-based cfd applications for hybrid and heterogeneous HPC platforms [J/OL]. *arXiv: Computer Science*, 2015. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1505.07630>.
- [8] HOOGE A D, PALIN R B, JOHNSON S, *et al.* The Aerodynamic Development of the Tesla Model S - Part 2: Wheel Design Optimization [C]// SAE 2012 World Congress & Exhibition. SAE Technical Paper, 2012-01-0178.
- [9] 陈佳萍,贾青,杨志刚. 主动格栅位置及其导流板对气动阻力和冷却性能的影响 [C]// 2018 中国汽车工程学会汽车空气动力学分会学术年会论文集. 上海: 中国汽车工程学会, 2018.
The influence of active grille shutter location and underhood deflector design on aerodynamic drag and cooling performance [C]// 2018 Academic Annual Conference of Automotive Aerodynamic Committee. Shanghai: SAE-China, 2018.
- [10] THOMAS B, MONI I. The aerodynamic development of the new Audi Q5 [J]. *SAE International Journal of Passenger Cars -Mechanical Systems*, 2017, 10(2):1522.