

基于 Adjoint 方法的车辆外形空气动力学性能优化

任超¹, 周华¹, Tushar Jadhav²

(1.上汽大众前期研发, 201805; 2. ANSYS Inc.)

[摘 要] 由于环保法规对于汽车尾气排放和能源消耗的要求越来越严格, 因此对于各大整车企业来说, 提高车辆的燃油经济性成为首要任务。在此大背景下, 车辆外形优化设计更加侧重于改善其空气动力学性能, 特别是降低气动阻力大小。在各种外形优化方法中, adjoint 优化方法基于目标函数关于几何外形的敏感性进行外形优化, 由于其计算效率高、稳定性强, 该方法在近些年收到广泛关注。

本文主要目的是探索 adjoint 方法在车辆外形优化开发过程中的应用, 采用的车型为某款量产 SUV。首先, 进行了 adjoint 数值计算的网格敏感性分析, 讨论了不同网格方案对于优化结果的影响; 其次, 根据 adjoint 计算得到的车身表面阻力系数敏感性分布, 明确了下一步需要改型的局部区域, 分别是后视镜、A 柱、前扰流板以及尾灯, 然后针对各区域分别进行了造型优化; 此外, 通过定常和非定常流场求解共同验证 adjoint 方法的优化效果。定常数值计算用于 adjoint 优化过程中涉及的流场求解, 对于优化前后车辆的阻力系数改善效果验证, 通过定常与非定常相结合的方法, 从流场结构角度分析了阻力优化的原因。从定常数值计算 (RANS) 结果来看, 整体阻力系数降低 8 count, 从非定常数值计算结果来看, 优化后车辆的阻力系数降低 10 count。最终, 优化后的后视镜和前扰流板造型还通过整车风洞试验验证了减阻效果。

本文评估了 adjoint 方法在车辆空气动力学性能优化方面的高效性, 为后续广泛用于项目初期车辆外形优化提供了参考。

[关键词] 车辆外形优化; adjoint; 减阻; 数值计算; 风洞试验

Aerodynamic Optimization of Vehicle Configuration based on Adjoint Method

Chao Ren¹, Hua Zhou¹, Tushar Jadhav²

(1. SAIC Volkswagen, 201805; 2. ANSYS Inc.)

[Abstract] Due to the increasingly stringent environmental regulations all around the world confronted by exhaust emission and energy consumption, improving fuel economy has been the top priority for most

automotive manufacturers. In this context, the basic process for vehicle shape development has evolved into optimizing the design to achieve better aerodynamic characteristics, especially drag reduction. Of all the optimization approaches, the gradient-based adjoint method has currently received extensive attention for its high efficiency in calculating the objective sensitivity with respect to geometry parameters, which is the first and foremost step for subsequent shape modification.

In this work, the main goal is to explore the adjoint method through optimizing the vehicle shape for a lower drag based on a production SUV. Firstly, the influence of different mesh schemes was discussed on sensitivity prediction of aerodynamic drag. Secondly, according to the sensitivity distribution, several key areas, like the side mirrors, A pillars, air dam, and rear lamps, were respectively altered through mesh morphing process. Furthermore, the optimized effect was validated by steady as well as transient simulation. Steady Reynolds Averaged Navier Stokes (RANS) approach was used for the primal flow solution of adjoint calculations, while transient simulation with Stress Blended Eddy Simulation (SBES) was also performed on the baseline and the optimized vehicle for more detailed flow field structure. The overall drag reduction is approximately 8counts for steady result, and 10counts for unsteady solution. Finally, the drag reduction effect of the optimized side mirrors and air dam was correlated with full-scale wind tunnel test.

This paper evaluates the effectiveness of adjoint method for aerodynamic optimization of a production vehicle, which indicates more extensive and promising application of this approach in the early stage of vehicle development for its high efficiency as well as strong robustness.

[**Keyword**] Vehicle aerodynamic optimization, adjoint, drag reduction, numerical simulation, wind tunnel test

1 前言

车辆外形优化能够有效改进车辆空气动力学性能，进而达到减少燃油消耗的目的。近些年，各种外形优化算法在汽车改型方面得到了广泛应用，包括响应面方法（RSM），实验设计（DOE）和参数化设计（PD）^[1-4]。然而，传统 CFD 仿真获得的流场信息（比如速度场和压力场），并不能直观地帮助 CFD 工程师找到车辆外形的最佳改动方案以实现空气动力学性能优化。此外，传统优化方法基于车辆外形参数进行优化设计，过程中涉及算例数量较多，需要消耗大量计算资源。在此背景下，探索一种更加直观、高效的外形优化方法是非常必要的。

Adjoint 方法基于梯度优化算法，其寻优过程与外形参数的数量无关，因此能够节省大量计算时间，适合于研究多外形参数变化的优化设计问题，例如汽车的外形优化。因此近几年许多车企开始运用 adjoint 方法进行量产车型的外形优化设计^[5-14]。奥迪运用 adjoint 方法优化新奥迪 Q5 的车身外形，讨论了计算收敛性，明确了外形优化效果，并获得了该方法用于车辆外形优化计算的最佳参数设置^[15]。在意大利，菲亚特汽车的空气动力学工程师运用 adjoint 方法针对某款掀背车型进行了后扰流板和外后视镜的造型优化^[16]，最终获得了 4% 的减阻效果。美国通用公司评估了 adjoint 方法用于某款轿车外形优化的减阻效果^[17]，最终阻力系数降低了 5 count。此外，通用还针对另一款掀背车型运用 adjoint 方法优化了外后视镜几何造型^[18]，通过对优化后的造型进行风洞试验验证，最终获得 8 count 的减阻效果。

本文的主要目的是运用 adjoint 方法对某款量产 SUV 车型进行外形优计算，并通过整车风洞试验验证相应的减阻效果。本文的主要内容如下：首先，在 adjoint 网格敏感性分析的基础上计算车身表面阻力敏感性分布。其次，针对阻力敏感性较高的区域选定需要改型的局部区域。然后，通过定常和非定常计算综合评估优化造型的减阻效果。最终，借助整车风洞试验对优化效果进行验证。

2 研究方法

2.1 Adjoint 优化方法

根据流动偏微分控制方程离散和差分的先后顺序，Adjoint 优化方法可以分为离散 adjoint 方法和连续 adjoint 方法。对于离散 adjoint 方法，偏微分方程首先被离散，然后进行差分求解；而对于连续 adjoint 方法，首先对偏微分方程进行差分，然后再进行离散化求解。ANSYS 公司的 fluent 软件采用离散 adjoint 方法，也是本文所采用的方法。

Adjoint 优化计算的大致流程如图 1 所示^[19]。首先，进行 CAD 几何造型前处理，然后求解流场信息，并将结果输入 adjoint 求解器计算表面敏感性分布，进而确定改型区域。接下来通过 Fluent 的网格修改板块进行结构优化改型。最终，针对优化后的车辆造型重新求解流场，并评估是否满足优化要求，若满足，计算过程结束；若不满足，则继续进行新一轮的外形优化计算直到满足设定目标为止。

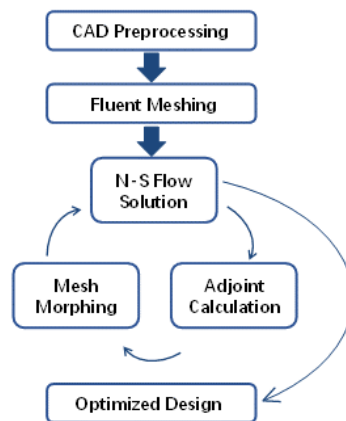


图 1 Adjoint 优化计算流程

2.2 湍流模型

本文定常数值计算采用的是 $k-\omega$ 湍流模型中的 GEKO 模型^[20]，非定常数值计算采用的是 SBES 模型。SBES 属于 RANS 和 LES 的混合模型，该模型具有改进的 shielding 方程，能够使 RANS 和 LES 模型的切换过程更加符合流动求解需要。该模型在 RANS 求解的边界层内流场剪切层发生分离的位置能够更快的切换到 LES 模型，而不仅仅是根据网格尺度进行切换，因此对于 SBES 模型可以使用较 LES 模型更粗的网格来计算流场而不影响到求解精度，从而能够大大提高计算效率^[21]。

3 空气动力学优化

本文采用的车型为一款量产 SUV，其几何外形包括了几乎所有的细节结构，包括刹车系统、悬架系统等零部件。为了尽可能避免发动机舱内流会增加外流场结构的复杂性，本文采用封闭进气格栅的处理方法，重点关注车身外部造型的 adjoint 减阻优化改型。

3.1 数值计算参数设置

本文数值计算网格方案以六面体为主，在壁面区域生成三棱柱网格，边界层网格依据 y^+ 自适应算法进行加密。计算域结构如图 2 所示，计算域地面设置了与 SAWTC 风洞试验段一致的地面移动带系统，包括一条中央移动带和四条车轮移动带，以便更加真实地模拟车身底部气流流动。此外，在车轮轮毂周围设置 MRF 区域实现对于旋转车轮的模拟。

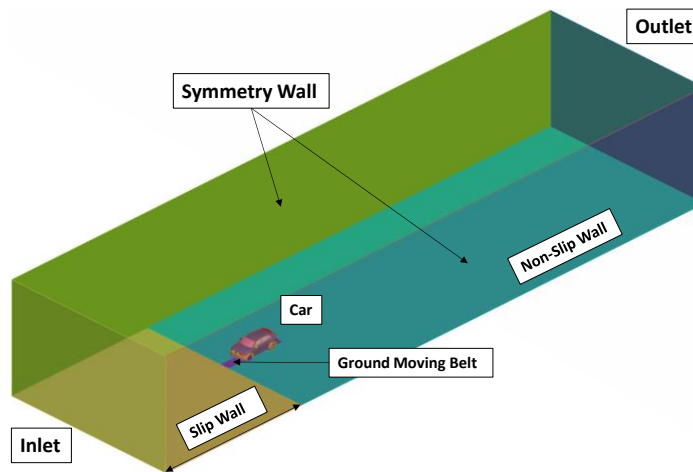


图 2 数值计算域示意图

图 3 展示的是计算域纵对称面上网格分布，可以看出在车身周围设有疏密程度依次递减的整车加密区，此外，在外后视镜、车顶扰流板、尾灯等区域还设置有局部加密区，以保证尽可能准确的模拟车身周围的复杂流动信息。车身周围共生成 10 层边界层网格，第一层网格高度满足 $y^+ < 1$ 。

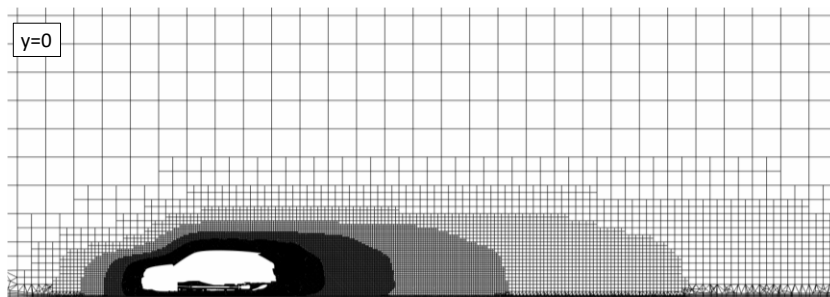


图 3 计算域纵对称面网格分布 ($y=0\text{mm}$)

表 1 给出的是仿真参数以及边界条件的设置，目的是尽可能与整车风洞试验条件保持一致。以车身长度和来流速度为基准，试验和数值计算的雷诺数为 1.24×10^7 。

表 1 数值计算参数设置

参数名称	设置
------	----

数值计算几何尺寸	1:1
计算域入口风速	140km/h
计算域出口压力	1.013bar
移动地面速度	140km/h
网格形式	Hex-core & Prisms

3.2 阻力敏感性分布

根据流场求解结果首先进行车身表面阻力敏感性的 adjoint 计算。图 4 给出的是车身表面敏感性分布结果，其中，红色区域阻力敏感性较高，表明对于该区域进行改型的减阻效果最好，相反，蓝色区域阻力敏感性相对较低。基于图 4 的结果，我们最终确定了下一步进行减阻优化的四个区域分别是，外后视镜、A 柱、前扰流板 and 尾灯。

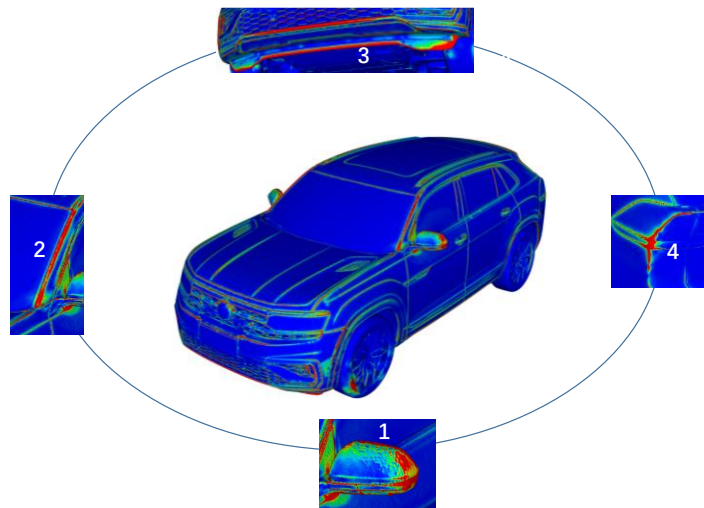


图 4 车身表面阻力系数敏感性分布（1.外后视镜；2.A 柱；3.前扰流板；4.尾灯）

针对四个改型区域，首先需要分别建立各自的计算域小盒子（如图 5 所示），然后逐一进行造型优化计算。

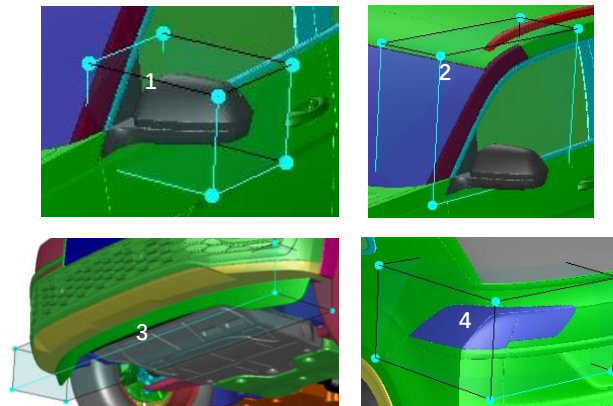


图 5 改型区域（1.外后视镜；2.A 柱；3.前扰流板；4.尾灯）

和定常工况的流场求解相比，adjoint 求解过程需要消耗大量的计算资源和求解时间，为了明确网格数量对于计算结果的影响，本文进行了四种方案的 adjoint 网格敏感性分析，保证各方案的面网格和边界层网格完全一致，改变外围网格疏密程度以及网格总数。图 6 给出的是四种网格方案外后视镜的 adjoint 计算 NOD 云图结果，其中蓝色区域表明网格节点沿法线方向向内移动能够起到减阻效果，红色区域表明网格节点沿法线方向向外移动能够减阻，可以看出四种网格方案的 NOD 云图非常接近，表明网格数量相对较少的方案 a 足以保证 adjoint 计算结果的收敛性。表 2 给出的是四种网格方案的计算时间对比，可以看出方案 a 与方案 d 相比计算时间减少了约 60%。由于方案 a 既能够保证计算收敛性又能够显著提升计算效率，因此本文后续 adjoint 优化计算均采用该网格方案。

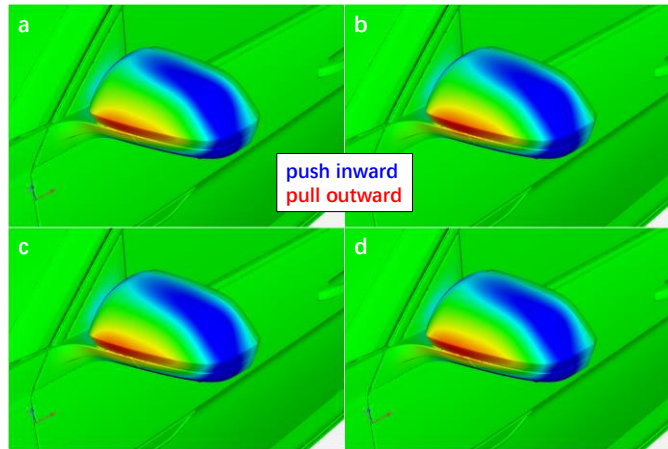


图 6 不同网格方案的外后视镜表面 NOD 云图结果对比

表 2 不同网格方案的计算效率对比

网格方案	网格数量(百万)	流场求解时间+Adjoint 求解时间(CPU Hours)
a	70	350+819
b	87	678+1003
c	113	1116+1651
d	129	1265+1739

3.3 外形优化结果分析

车身表面阻力敏感性和局部区域的改型计算结束之后，通过 Fluent 自带的网格改型工具来实现改型优化，所有改型区域内指定的表面和节点均会根据 NOD 计算结果进行相应的改动。基于优化后的造型，需要重新求解流场来最终确定 adjoint 优化方法的改型减阻效果。

在各种 adjoint 计算参数中，目标函数优化量的设置需要格外谨慎，因为其对 adjoint 优化计算的收敛性和最终优化造型有显著影响，表 3 给出的是本文四个改型区域经过多次测试后最终确定下来的 C_D 优化目标值。接下来逐一给出各区域优化前后的几何造型对比以及流场信息对比。

表 3 Adjoint 优化计算的目标函数设置

区域	名称	ΔC_D 目标值
1	外后视镜	-2%
2	A 柱	-0.5%
3	前扰流板	-2%
4	尾灯	-0.5%

图 7 左边展示的是外后视镜垂直截面以及水平截面上改型前后的几何结构对比，右边给出的是改型前后外后视镜区域总压系数等值面分布图。可以看出，改型后外后视镜下游的流动分离区域尺度减小，意味着气流动能损失减少，从而能够降低绕流外后视镜产生的气动阻力。通过两侧外后视镜造型优化，共可获得 3 count 的整车减阻效果。

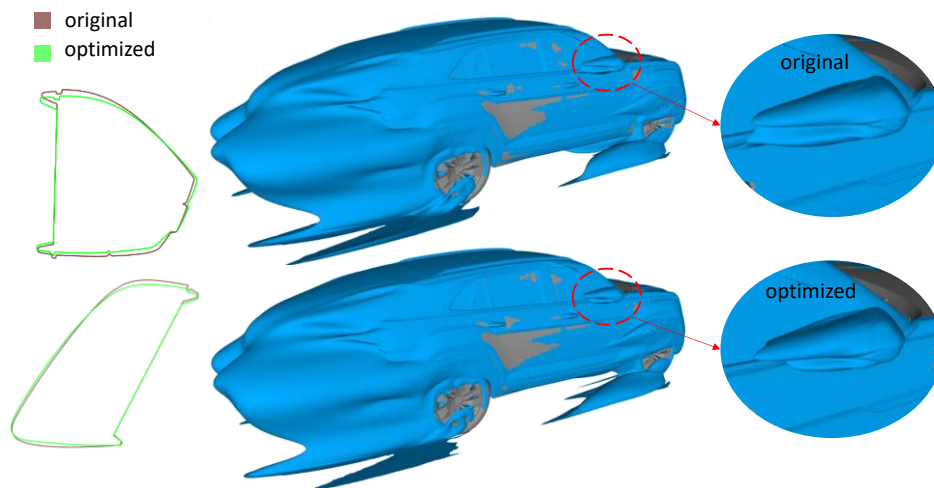


图 7 外后视镜改型方案示意图以及 $C_{pt}=0$ 等值面分布图对比

图 8 给出的是 A 柱改型前后水平截面上的几何结构对比以及 A 柱区域总压系数等值面分布图。从图中可知优化改型之后，从 A 柱脱落的分离涡结构一定程度上受到了抑制，导致了流动分离区域减小，从而降低了气动阻力。最终，两侧 A 柱造型优化可以获得 2 count 的阻力系数降低。

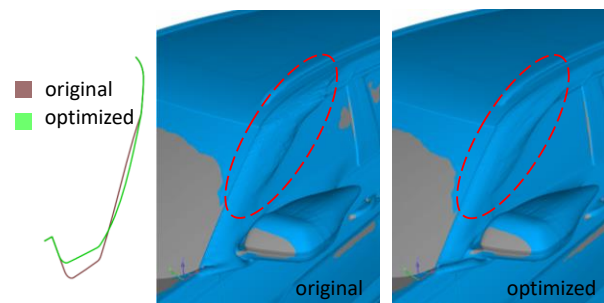


图 8 A 柱改型方案示意图以及 $C_{pt}=0$ 的等值面分布图对比

图 9 给出的是纵对称面上前扰流板区域改型前后的几何结构以及速度云图对比。可以看出对于新造型，气流流过前扰流板后能够更加贴合车身底面向下游流动，车底低速区区域明显减小，气流流速加快，因此前扰流板改型方案带来了 3 count 的整车阻力系数优化。

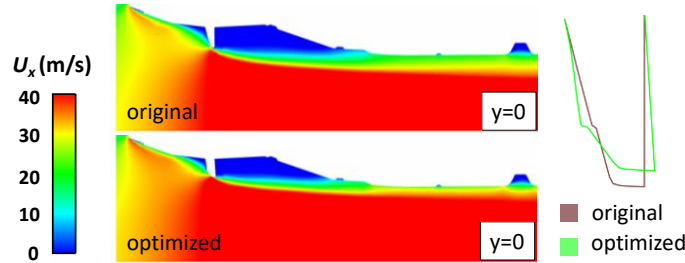


图 9 前扰流板改型方案示意图以及纵对称面上的速度分布对比

图 10 展示的是在尾灯区域水平截面上的几何改型结果和速度云图分布。可以看出改型后，气流能够更加平顺的绕流过尾灯，进而使得车身尾迹区宽度减小，最终获得更低的阻力系数。尾灯的改型方案大约能够获得 1count 的整车阻力优化。

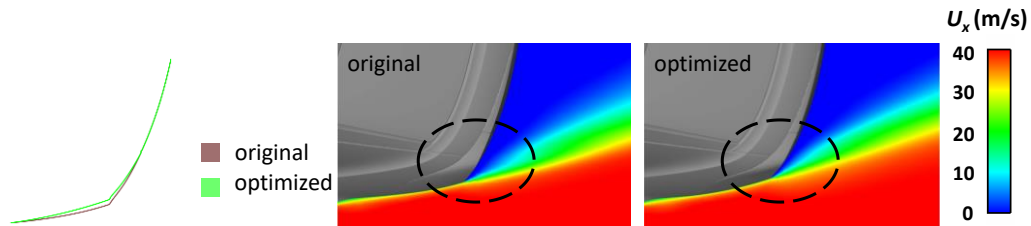


图 10 尾灯的改型方案示意图以及计算域水平截面上的速度分布对比

图 11 展示的是 adjoint 改型后四个区域获得的阻力优化结果。对于各个区域，外形优化均能获得 1~3count 不等的减阻效果。其中，外后视镜和前扰流板的减阻效果最为显著。

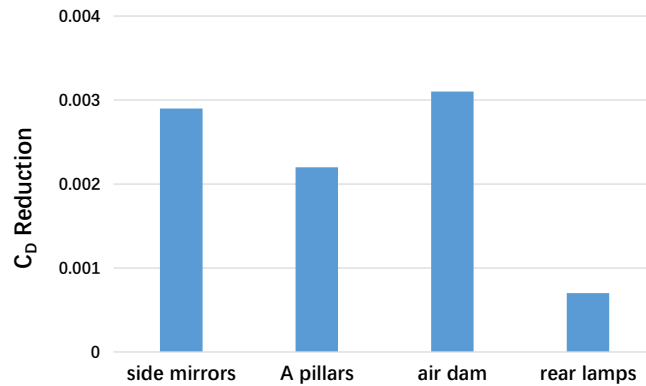


图 11 局部造型优化后获得的减阻量

为了进一步明确 adjoint 优化改型带来的减阻效果，本文还采用非定常湍流模型求解车辆外流场^[22-24]，并分析了阻力系数以及流场信息在改型前后的变化。

在非定常计算之初采用较大的时间步长加快流场的初始求解速度，然后时间步长逐步减小，最后采用 5×10^{-4} 秒的时间步长计算物理时间 2 秒，并对最后 1 秒的流场信息进行采样以及后续的时均结果处理。图 12 给出的是阻力系数随着物理时间发展的变化曲线，其中

蓝色线条代表原始车型，橙色线条代表四个区域优化后的最终造型。可以看出经过 adjoint 造型优化，无论是从瞬态结果还是时均结果来看，阻力系数均有明显降低。

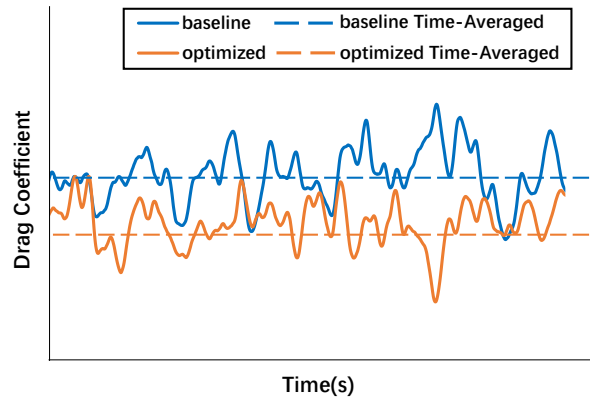


图 12 改型前后 C_D 瞬态结果与时均结果对比

表 4 给出的是四个区域同时改型获得的整车减阻量，可以看出定常计算 C_D 降低了 8count，非定常计算 C_D 降低了 10count，定常和非定常计算结果误差足够小，充分表明了 adjoint 外形优化结果的有效性。

表 4 C_D 计算结果对比

湍流模型	整车减阻量
GEKO(定常计算)	7.9counts
SBES (非定常计算)	9.8counts

图 13 展示了改型前后车身表面时均压力分布结果，可以观察到改型后的车身背压明显升高，从而直观解释了阻力系数优化的原因。

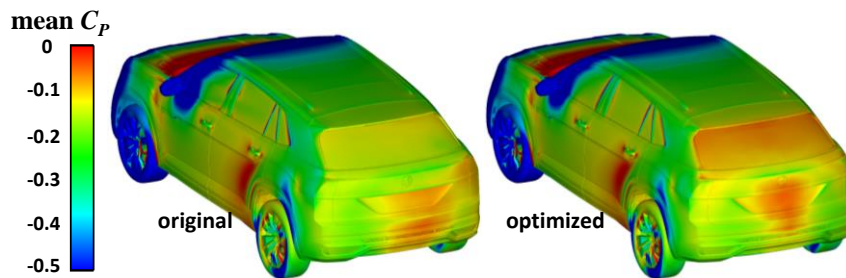


图 13 改型前后的车身表面压力时均分布结果对比

图 14 显示了外形优化前后，外后视镜、A 柱以及前扰流板表面的阻力系数敏感性分布。可以看出改型过后，原来阻力系数敏感度较高的区域红色程度降低，表明该区域对于阻力系数敏感性降低，也从另一侧面说明了该区域的外形优化取得了减阻效果。

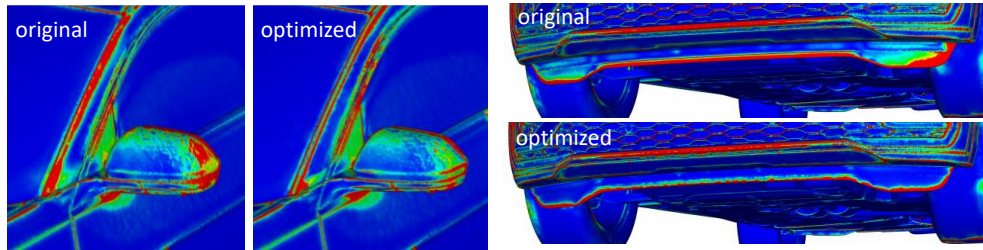


图 14 改型前后车身表面压力敏感性分布对比（上图：外后视镜和 A 柱；下图：前扰流板）

4 风洞试验验证

Adjoint 优化改型效果试验验证在 SAWTC 的气动声学整车风洞进行,该风洞是具有 3/4 开口式试验段的回流式风洞,带有先进的五带移动地面模拟系统,能够更加真实的模拟车辆实际行驶过程中车身周围的空气流动,尽可能排除风洞地面边界层对试验结果的影响 [25,26],具体试验过程的参数设置参照图 5。

上文涉及到的改型区域中, A 柱以及尾灯在实车上的换装难度较大,因此考虑到更换车身零部件的可行性,本次试验的改型部件选择外后视镜和前扰流板,二者也是数值计算减阻效果最为明显的区域,优化后造型采用 ABS 材料制作样件。试验工况包括原始车型以及优化后造型的整车风阻测试。

由于外后视镜可以分为镜片和镜壳两个部分,因此对于镜片大小是否改变我们准备了两种改型方案,具体结构如图 15 所示:方案 1 镜片固定不动,只改动镜壳;方案 2 镜片和镜壳均进行改型。其中方案 2 即上文提到的外后视镜优化方案。增加方案 1 出于两点考虑:一是为了增加一组试验数据,进而对于 adjoint 优化效果的验证能够更加充分;二是考虑到镜片改动有可能会影响到驾驶员的视野范围,因此增加了一组镜片固定的外后视镜优化造型。

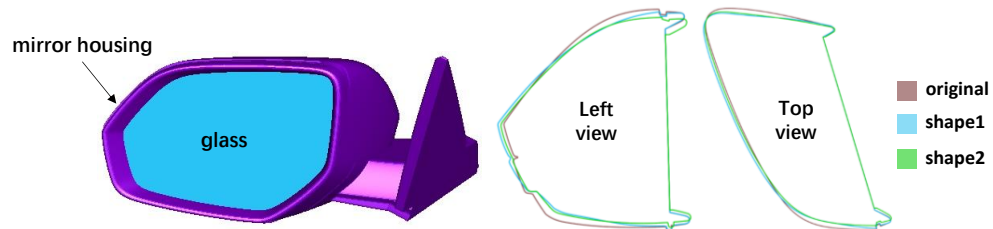


图 15 外后视镜优化方案

图 16 和图 17 给出的是本次风洞试验照片,其中图 16 展示的是不同方案的外后视镜,图 17 展示的是不同方案的前扰流板。

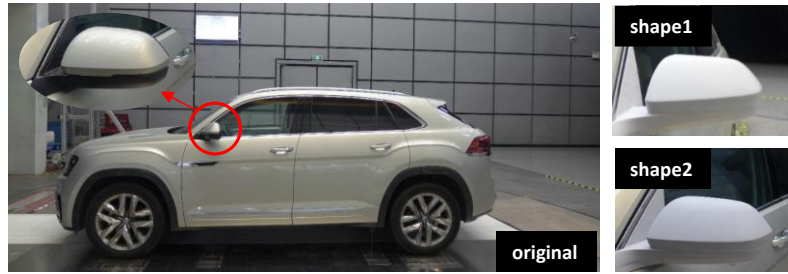


图 16 不同外后视镜方案的风洞试验照片

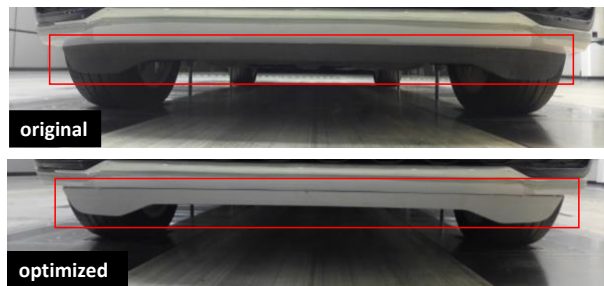


图 17 不同前扰流板的风洞试验照片

图 18 给出的是风洞试验阻力系数与数值计算结果的对比。可以看出，无论是外后视镜还是前扰流板，数值计算与风洞试验结果均吻合较好。对于外后视镜，方案 2 造型的减阻效果明显优于方案 1，因此在镜片微小改动不影响视野的前提下，应该考虑方案 2。对于前扰流板，数值计算与风洞试验均获得了约为 3count 的减阻效果。

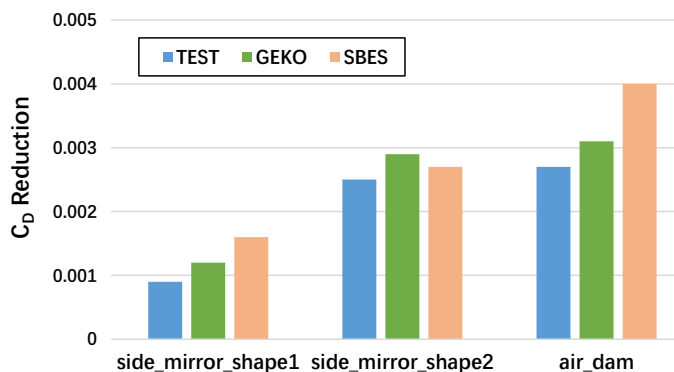


图 18 数值计算与风洞试验的优化后外形减阻效果对比

综上所述，通过数值计算以及整车风洞试验，adjoint 优化方法的有效性和可靠性得到了较为充分的验证，与传统优化方法相比具有更强的针对性以及更高的优化效率。

5 结论和展望

本文针对某款量产 SUV 车型，进行了基于 adjoint 外形优化方法的车辆空气动力学性能减阻方案研究。

首先，通过网格敏感性以及计算精度的对比分析，确定 adjoint 计算流程的最佳网格方案。然后，基于车身表面压力敏感性分布，明确需要改型的具体区域，并针对各区域分别进行优化改型。最后，对于优化后造型重新求解流场，定常计算获得 8count 阻力系数减阻效果，非定常计算结果为 10count。此外，结合整车风洞试验验证了 adjoint 优化计算的有效性。

本文 adjoint 优化计算涉及的流场求解均为定常计算，下一步我们将讨论定常以及非定常初始场对于 adjoint 优化结果的影响。此外，本文的 adjoint 优化计算目标函数是单一的降低阻力系数，我们后续还将进行多目标函数的 adjoint 外形优化计算，在降低阻力系数的同时，降低升力系数等，实现车辆空气动力学性能的综合优化。

参考文献

- [1] Fang, T., "The Uniform Design: Application of Number-Theoretic Methods in Experimental Design," Acta Math. Appl. Sinica 3: 363-372, 1980.
- [2] Saad, Y. and Schultz, M., "GMRES: A Generalized Minimal Residual Algorithm for Solving Non-symmetric Linear Systems," SIAM J. Sci. Stat. Comput. 7(3), 1986: 856-869.
- [3] Cogotti, A., "A Parametric Study of the Ground Effect of a Simplified Car Model," SAE Technical Paper 980031, 1998.
- [4] Othmer, C. and Grahs, T., "Approaches to Fluid Dynamic Optimization in the Car Development Process," Proceedings of the EUROGEN Conference, Munich, Germany 2005.
- [5] Giles, M.B. and Pierce, N.A., "An Introduction to the Adjoint Approach to Design," Flow, Turbulence and Combustion 65(3-4):393-415, 2000, doi:10.1023/A:1011430410075.
- [6] Papadimitriou, I. and Giannakoglou, C., "Aerodynamic Shape Optimization Using First and Second Order Adjoint and Direct Approaches," Archives of Computational Methods in Engineering 15(4): 447-488, 2008, doi:10.1007/s11831-008-9025-y.
- [7] Han, T., Hill, C. and Jindal, S., "Adjoint Method for Aerodynamic Shape Improvement in Comparison with Surface Pressure Gradient Method," SAE Technical Paper 2011-01-0151, 2011, doi:10.4271/2011-01-0151.
- [8] Hill, C., "The Automatic Generation of Adjoint Solutions for a General-Purpose Flow Solver," 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, January 2008, Reno, Nevada.
- [9] Zhang, Y., Li, J., Xu, C. and Zhu, Z., "Vehicle Aerodynamic Optimization: On a Combination of Adjoint Method and Efficient Global Optimization Algorithm," SAE Int. J. Passeng. Cars-Mech. Syst. 12(2): 139-153, 2019, doi:10.4271/06-12-02-0011.
- [10] Pironneau, O., "On optimum design in fluid mechanics. Journal of Fluid Mechanics," 1974, 64: 97-110.

- [11] Löhner, R., Soto, O. and Yang, C., "An adjoint-based design methodology for CFD optimization problems," AIAA-03-0299, 2003.
- [12] Helgason, E. and Krajnovic, S., "Aerodynamic Shape Optimization of a Pipe using the Adjoint Method," Proceedings of the ASME 2012 International Mechanical Engineering Congress & Exposition, Houston, Texas, USA, IMECE 2012.
- [13] Jakubek, D. and Wagner, C., "Shape Optimization of Train Head Cars using Adjoint-Based Computational Fluid Dynamics," Proceedings of the First International Conference on Railway Technology, Las Palmas de Gran Canaria, Spain 2012.
- [14] Othmer, C., "Adjoint Methods for Car Aerodynamics," Journal of Mathematics in Industry, 2014, 4:6, doi:10.1186/2190-5983-4-6.
- [15] Blacha, T., Gregerson, M., Islam, M. and Bensler, H., "Application of the Adjoint Method for Vehicle Aerodynamic Optimization," SAE Technical Paper 2016-01-1615, 2016, doi:10.4271/2016-01-1615.
- [16] Francesconi Ing, G., Miretti, L., Lorefice, L., Pitillo Ing, F. et al, "Application of Adjoint Methods on Drag Reduction of Current Production Cars," SAE Technical Paper 2018-37-0016, 2018, doi:10.4271/ 2018-37-0016.
- [17] Han, T., Kaushik, S. , Karbon, K., Leroy, B. et al, "Adjoint-Driven Aerodynamic Shape Optimization based on a Combination of Steady State and Transient Flow Solutions," SAE Technical Paper 2016-01-1599, 2016, doi:10.4271/2016-01-1599.
- [18] Magazoni, F., Maruyama, F., Buscariolo, F., Alves, J. et al, "Aerodynamic Shape Improvement for Driver Side View Mirror of Hatchback Vehicle Using Adjoint Optimization Method," SAE Technical Paper 2015-36-0156, 2015, doi:10.4271/2015-36-0156.
- [19] ANSYS FLUENT 16 - Adjoint Solver Module Manual, ANSYS, Inc., Canonsburg, PA, 2015.
- [20] Menter, R., Matyushenko, A. and Lechner, R., "Development of a Generalized k- ω Two-Equation Turbulence Model," Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design, vol 142, 2018.
- [21] Buscariolo, F., Magazoni, F., Wolf, M., Maruyama, F. et al, "Analysis of Turbulence Models Applied to CFD Drag Simulations of a Small Hatchback Vehicle," SAE Technical Paper 2016-36-0201, 2016, doi:10.4271/2016-36-0201.
- [22] Islam, M., Decker, F., Villiers, E., Jackson, A. et al, "Application of Detached-Eddy Simulation for Automotive Aerodynamics Development," SAE Technical Paper 2009-01-0333, 2009.
- [23] Heft, I., Indinger, T. and Adams, A., "Investigation of Unsteady Flow Structures in the Wake of a Realistic Generic Car Model," 29th AIAA Applied Aerodynamics Conference, June 2011, Honolulu, Hawaii, AIAA-2011-3669.
- [24] Menter, R., "A New Paradigm in Hybrid RANS-LES Modeling," Proceedings of the 6th Symposium on Hybrid RANS-LES Methods, pp. 1-17, 2016.
- [25] Strangfeld, C., Wieser, D., Schmidt, H., Woszidlo, R. et al., "Experimental Study of Baseline Flow Characteristics for the Realistic Car Model DrivAer," SAE Technical Paper 2013-01-1251, 2013, doi:10.4271/2013-01-1251.



- [26] Mack, S., Indinger, T., Adams, A. and Unterlechner, P., "The Ground-Simulation Upgrade of the Large Wind Tunnel at the Technische Universität München," SAE Technical Paper, 2012-01-0299, 2012, doi:10.4271/2012-01-0299.

致谢

感谢 ANSYS 公司产品研发部门徐敏博士的帮助和支持, 感谢 ANSYS 公司印度分公司 Rohitkumar 和 Tushar 的技术支持, 另外感谢上海翼锐公司翟荣华在本次研究过程中给与的大力帮助。此外, 本文的研究过程中离不开上汽大众 CFD 部门同事的支持, 在此一并感谢, 正是各位的通力合作才使我们获得了最终的研究成果并完成了论文撰写。最后, 还要感谢上海地面交通工具风洞中心的各位工程师对于风洞试验的巨大帮助。

英文缩写和参数定义

CAD	Computer Aided Design
C_D	Drag Coefficient
CFD	Computational Fluid Dynamics
C_{ptot}	Total pressure coefficient
GEKO	Generalized K Omega
IDDES	Improved Delayed Detached Eddy Simulation
LES	Large Eddy Simulation
RANS	Reynolds-Averaged Navier-Stokes
SBES	Stress Blended Eddy Simulation
SST	Shear Stress Transport