

# 基于全流程优化的纯电轿车低风阻性能开发

邓培，王小碧，王伟民，陈星，宋晓颖，董哲明  
东风汽车集团有限公司技术中心

**【摘要】**为提升纯电动轿车的续驶性能，动力经济性对风阻性能提出了更有挑战性的要求。纯电动轿车风阻之所以能够做到比燃油车低，主要原因在于纯电轿车造型风格、机舱布置、底盘下车体等与传统燃油车相比发生了很大变化，而这些变化均向着有利于低风阻的方向发展。本文详细介绍了涉及造型、工程、成本和风阻协同开发的全流程优化及设计方法，应用CFD仿真技术方法对某款纯电轿车的机罩、前保险杠、扰流板、后视镜和下护板等区域同时结合工程和成本进行了仿真和优化，在鸭尾和扩散器两特征对风阻性能有互相影响的地方采用DOE优化方法得到了最优设计方案。最后采用油泥模型风洞试验的方法对以上优化方案进行了验证，达成了整车动力经济性维度提出的风阻目标，确立的基于全流程优化的纯电轿车低风阻性能开发方法，为后续车型的低风阻性能开发提供有力的技术支撑。

**【关键词】** 纯电轿车，风阻性能，CFD仿真，风洞试验

## Development of Aerodynamic Performance of EV Sedan Based on Whole Process Optimization

Deng Pei, Wang Xiaobi, Wang Weimin, Chen Xing, Song Xiaoying, Dong Zheming

Technology Center, Dongfeng Motor Group Corporation

**Abstract:** In order to extend the cruise range of EV Sedan, the vehicle dynamic economics performance requires a challenging aerodynamic performance. The main reason why battery electric cars have lower drag performance compared to gasoline cars is that there have been significant changes in the design style, cabin layout, chassis and body of battery electric cars compared to traditional gasoline cars, which leading to a better development tendency for aerodynamic performance. This article provides a detailed introduction to the entire process optimization and design methods involved in the coordinated development of styling, engineering, cost, and wind resistance. CFD simulation technology has been applied to simulate and optimize the hood, front bumper, spoiler, rearview mirror, and lower guard of a battery electric vehicle, combining with engineering and cost. The optimization method of DOE was used to obtain the optimal design scheme in areas where the characteristics of the duck tail and diffuser have mutual effects on wind resistance performance. Finally, the above optimization scheme was validated through wind tunnel tests using a clay model, achieving the drag target proposed in the vehicle dynamic economy performance dimension. The development method for low drag performance of battery electric vehicles based on full process optimization was established, providing strong technical support for the development of low drag performance of subsequent vehicles.

**Key words:** EV sedan, aerodynamic performance, CFD simulation, wind tunnel test

## 引言

2020年9月中国明确提出2030年“碳达峰”与2060年“碳中和”目标，“双碳”战略倡导绿色、环保、低碳的生活方式，加快降低碳排放步伐，有利于引导绿色技术创新，提高产业和经济的全球竞争力。在“双碳政策”的指引下，汽车行业也加速了节能减排的脚步，2022年新能源汽车总销量达到688.7万辆，同比2021年增长了93.4%，新能源乘用车销量为654.9万辆，同比增长了94.26%。根据最新统计结果，新能源汽车在中国乘用车上的渗透率从2021年的15.5%上升到2022年的27.6%，传统燃油车的比重在不断下滑，目前新能源汽车保有量1310万辆，同比增长67.13%，呈高速增长态势<sup>[1]</sup>。汽车的空气动力学特性对汽车的经济性、动力性等一系列性能有着重要的影响，并与操纵性和安全性紧密联系，汽车空气动力学成为了目前研究的重点。

超低风阻越来越受到新能源汽车行业的重视，首先新能

源车解决了各企业的碳积分政策要求；然后超低风阻值已成为目前各大主机厂车型宣传的亮点，新车型的出现伴随的是风阻性能的行业较量；最重要的是低风阻可以大幅度地降低整车电池成本及增加续驶里程，如表1中所示，以风阻减小10count为例可以提升续驶里程6~8km，400万销量量纲的电动车可降低成本36亿元，在目前降成本的大趋势下，超低风阻的设计成为降低整车成本、减轻车辆重量、提升续驶里程的重要措施之一。

表1 低风阻对整车性能和成本的改善效果

降阻 10count 对应效果	
降低电量/(kW·h/100km)	0.18
单车节约成本/元	900
减重/kg	40
提升续驶里程/km	6~8

# 1 整车风阻性能研究基础

## 1.1 整车风阻性能的研究范围

汽车在水平道路上等速行驶时，必须克服来自地面的滚动阻力和来自空气的空气阻力，当汽车在坡道上上坡行驶时或者加速行驶时还会受到坡道阻力和加速阻力<sup>[2]</sup>。本文研究为车辆在水平道路上等速行驶工况。因此，为了提升电动车的续驶里程，必须降低滚动阻力和空气阻力。目前降低滚阻的常用方法有低滚阻轮胎、低拖滞卡钳、低摩擦力矩轴承等，但均降幅较小，因此降低空气阻力目前成为了提升续驶里程的重要措施之一。

汽车在行驶的过程中受到的力是非常复杂的，作用在汽车上的六个力包括：气动阻力、气动升力、气动侧向力、气动纵倾力矩、气动横摆力矩和气动侧倾力矩，这些力统称为六分力，如图 1 所示。其中整车气动阻力  $D$  是汽车在空气中行驶时横摆角为  $0^\circ$  时车身纵向受到的力，也即车辆在直线行驶时空气作用在行驶方向上的分力<sup>[2]</sup>。

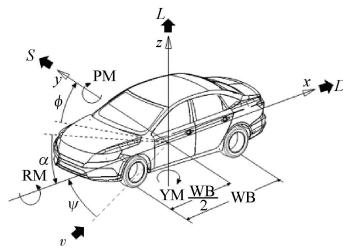


图 1 空气动力学六分力

空气阻力分为压力阻力与摩擦阻力两部分。作用在汽车外形表面上的法向压力的合力在行驶方向的分力，成为压力阻力；摩擦阻力是由于空气的黏性在车身表面产生的切向力的合力在行驶方向的分力。压力阻力又分为四部分：形状阻力、干扰阻力、内循环阻力和诱导阻力。形状阻力跟车身主体形状有很大关系，干扰阻力是车身表面突起物引起的阻力，内循环阻力指机舱、底盘等被空气流经的内部结构引起的阻力，诱导阻力是空气升力在水平方向的投影<sup>[2]</sup>。其中，这几部分的阻力在一般轿车中的占比见表 2。

表 2 气动阻力组成及占比

组成气动阻力的部分及占比	
形状阻力	58%
干扰阻力	14%
内循环阻力	12%
诱导阻力	7%
摩擦阻力	9%

在汽车的行驶范围内，空气阻力的数值通常都总结成与气流相对速度的动压力成正比例的形式，即：

$$F_w = \frac{1}{2} C_d A \rho u_r^2 \quad (1)$$

式中  $F_w$  是空气阻力（单位是 N）； $C_d$  是气动阻力系数，是一个无量纲数，为书写方便同时也用  $C_d$  表示； $A$  是迎风面

积，即车辆在汽车行驶方向上的投影面积，单位是  $m^2$ ； $\rho$  是空气密度，单位是  $kg/m^3$ ； $u_r$  为相对速度，即无风时汽车的行驶速度，单位是  $km/h$ 。

通过式（1）表明，空气阻力与  $C_d$  及  $A$  的值呈正比，减小空气阻力就要降低  $C_d$  和  $A$  的值。其中  $A$  值受到乘坐空间的限制不易进一步减小，所以降低  $C_d$  值是降低空气阻力的主要手段。

## 1.2 纯电轿车整车风阻的要因分析

与传统燃油车相比，纯电动轿车比较易达成低风阻性能，见表 3，纯电动轿车造型风格低风阻化：弓型车身、大溜背设计、外凸椭圆车头、小格栅、锋利车尾等，利于气流分离；机舱内驱动系统等零件的布置使得造型可以做成满足工程的低风阻型面；因无传统发动机的热害问题，车身底部护板的全覆盖及平整化使得下车体流场更加低风阻化。对于一些“油改电”的车型，只是外造型小幅改动，风阻系数达不到最佳状态；无论是全新的电动轿车或“油改电”轿车车型，要做到超低风阻，必须要从整体项目开发上进行全流程开发，实现降阻目标。

表 3 电动车与燃油车影响风阻的特征对比

区别点	燃油车	电动车
造型风格	传统设计，多数采用折背形	前卫设计，整体弓形大溜背，对低风阻更有利
机舱布置	无主动进气格栅，机舱内阻大 机舱内需布置动力系统导致舱体较厚，机盖前后缘均较高	有主动进气格栅，极大降低机舱内阻 机舱内零件少，舱体薄，机盖前缘低，对低风阻更有利
底盘下车体	因热害等问题，底盘不能全覆盖下护板	无热害问题，底护板平整度高，覆盖面积广，利于降风阻
对续驶里程的影响	影响较小	影响较大

## 2 整车低风阻性能开发方法

对于纯电轿车整车低风阻性能设计及开发，既需要更加协同的低风阻性能开发流程，也需要更加智能的低风阻设计及优化方法。

### 2.1 整车风阻性能协同开发流程

整车风阻性能协同开发流程如图 2 所示，根据动力经济性定义的能耗目标进行分解，提出整车风阻目标。在项目和造型的早期阶段进行风阻设计点检及约束。造型数据出来之后进行整车风阻仿真及优化，优化到整车风阻满足性能目标时输出优化方案给各个专业，进行造型、工程、成本分析，在满足造型意图、工程可行性、成本的要求下，可开展油泥模型风洞试验验证及优化，通常是在造型冻结之前；如果不满足造型、工程及成本的情况下，需要对风阻进一步优化，寻找优化方案直至同时满足风阻、造型、工程、成本的要求。通过油泥模型风洞试验对初始方案和优化方案进行试验

验证，对于验证有效的方案进行推进，在造型、工程、成本等要求满足的情况下实施在整车设计上，至此造型、工程基本固化，成本分析还在进一步研究中，因工艺、成本等做的小调整还需要进一步验证和优化，此时基本不再做大的调整。在实车出来之后进行实车风洞试验验证，不满足性能目标时，需根据实车的结果进行仿真模型和油泥模型调整及再次优化，直至整车实车风阻性能达成。

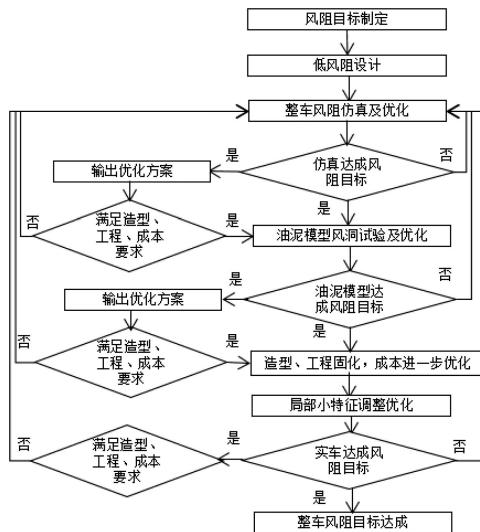


图 2 整车风阻性能协同开发流程

## 2.2 整车风阻性能开发方法

目前低风阻研究的常用方法有数值分析法、油泥模型风洞试验法、实车风洞试验法、实车道路试验法，这四种方法分别用在项目的不同时期，行业运用了这些方法也取得了一些非常明显的效果。

数值分析应用在了很多车型的开发和应用中。中汽研的王庆洋<sup>[3]</sup>等对某款货车通过 STAR-CCM+求解得到牵引车和拖车区域的风阻分别占约整车风阻的 51% 和 35%，从而确定了牵引车区域、拖车与牵引车之间和拖车尾部为气动优化对象，通过增加顶部整流罩、导流板、尾板分别实现降阻 25%、15%、4.7%，综合方法优化降阻 27.4%。北京航空航天大学的康宁<sup>[4]</sup>等对汽车前轮阻风板安装位置、宽、高及曲率半径这 4 个因素与风阻相关性进行了单因素研究，发现阻风板的安装部位及其宽对整车风阻影响很小，同时发现阻风板的曲率半径  $R$  为 15mm，高为 10mm 时方案最优，可降低 14.7% 的风阻。罗秋丽<sup>[5]</sup>等使用数值分析的方法对比亚迪汉进行了空气动力学的开发，通过降低机罩面降阻 5count，AGS 在关闭状态下风阻系数相比打开状态下风阻系数降低了 12count。

油泥模型风洞试验方法通常是先基于数值分析法来做的，风洞试验可以准确验证模型的准确风阻同时可以测量方案实际有效的贡献量。袁志群<sup>[6]</sup>等对某款轿车简化模型进行了数值分析和风洞试验研究，发现相对于平滑底部的汽车，复杂结构底部的汽车风阻增加了 52.3count，同时研究尾气改善气流流场，当车速是 30m/s 时存在最佳尾气排放速度可降低整车风阻 13.6count。中汽中心的刘学龙<sup>[7]</sup>等对某

款 SUV 采用软件数值分析的方法，发现在前后车轮前部增加阻风板可减阻 16count，但是在前保险杠下方增加高度为 40mm 的阻风板时却效果不好，效果不到 0.5%，因此前保险杠阻风板的形状、高度、位置等需要根据整车总体参数和底部结构充分优化和分析才能确定方法，甚至确定是否需要配备。长安汽车的李林<sup>[8]</sup>等采用软件数值分析和风洞试验结合的方法研究了 40mm 高的前唇、封住部分格栅开口、增加前舱导流板及密封、加宽加长前轮导流板，可降风阻 36count，提升 10% 的空气动力学性能。

## 3 整车低风阻开发应用案例

### 3.1 某款纯电轿车风阻目标的确定

本文研究的该款纯电轿车，其整车动力经济性目标定义见表 4，在该款车型动力经济性性能目标要求下，对整车风阻性能提出了挑战性的目标，整车风阻性能目标为  $0.21C_d$ 。

表 4 整车动能经济性及风阻性能要求

性能项目		某款纯电轿车
动力经济性	0—100km/h 动力性	$\leq X_s$
	能耗	XX kW · h/100km
	续驶里程	$\geq XXX \text{ km}$
风阻性能	风阻系数	$0.21C_d$

### 3.2 某款纯电轿车的风阻仿真及优化

对研究的这款纯电轿车采用 CFD 仿真的方法，使用 STAR-CCM+ 软件对整车进行风阻仿真和优化，在经过多轮 CAS 低风阻点检约束及优化后，整车风阻仿真的结果距离目标值还有一定的距离。除去已经优化实施的弓形大溜背造型、趋于水平的前风窗布置外，对该款纯电轿车通过 CFD 的方法优化了造型局部特征和低风阻套件的局部特征，包括机罩、前保险杠两侧型面、前轮扰流板、后视镜、下护板、后悬架摆臂处等区域；其中对于鸭尾和扩散器，这两处特征对于车尾气流互相影响，需要基于 CFD 流场仿真，采用 DOE 智能优化的方法来进一步优化出最优解。

#### 3.2.1 机罩型面优化

机罩上表面的造型型面受工程和各种性能影响，既要满足法规对于车辆外部凸出物、碰撞安全行人保护等要求，又考虑机罩锁、前段模块等系统布置、同时受前悬种类的约束，因此只能在满足以上的前提下进行型面优化。如图 3 所示，为改善机罩盖附近的流场，把机罩局部下压进行优化。

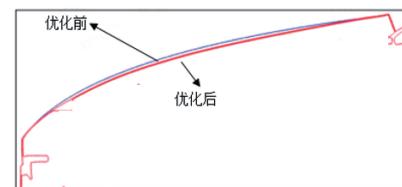


图 3 机罩型面优化前后对比图

通过图 4 中机罩型面优化前后压力系数对比图可以看出，机盖下压特别是机盖前沿下压可以加速机盖表面气流，



图 4 机罩型面优化前后压力系数对比图

一定程度上可改善车头正压区。该方案降低风阻 3count 且不增加成本。

### 3.2.2 前保险杠两侧型面优化

前保险杠两侧的型面决定着撞到车前的气流如何向车后方流动，又因前保险杠两侧通常装有雷达，受雷达布置安装面的影响，在工程可行的情况下，如图 5 所示，把前保险杠两侧的型面局部外扩一下改善前保险杠两侧的流场。

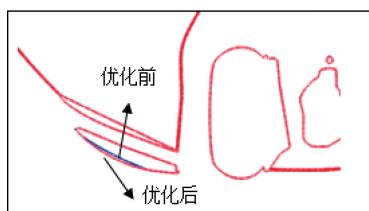


图 5 前保险杠两侧优化前后对比图

通过图 6 中前保险杠两侧优化前后湍动能对比图可以看出，前保险杠两侧外扩一定程度改善了前保险杠两侧气流贴体性，有助于改善前保险杠两侧的气流分离，降低风阻 1count 且不增加成本。

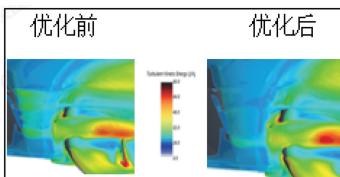


图 6 前保险杠侧面优化前后湍动能对比图

### 3.2.3 鸭尾和扩散器优化

对于溜背轿车来说，车位处的鸭尾决定流经上部车身的气流是否会有下洗的情况发生，而车尾底部的扩散器则决定车底部的气流是否会有上洗的情况发生。其中下洗气流和上洗气流在车尾部交汇决定着车尾钣金面上的背压，设计不好时会导致尾部涡流区域较大、负压多，不利于降风阻。针对这种相互影响的设计特征，本文采用 DOE 智能优化的方法进行综合优化，优化流程如图 7 所示。

根据图 7 中的优化流程，和造型、工程、成本进行沟通，确认变量及其变化区间范围，见表 5。然后采用网格变形的方法对鸭尾和扩散器进行网格控制变形，详细如图 8 中所示的鸭尾和扩散器的变形控制体，使用变形控制体对网格进行优化变形。

表 5 变量取值范围

变量描述	变量区间/mm
鸭尾下压上抬高度_H1	-10~20
扩散器下压上抬高度_H2	-15~15

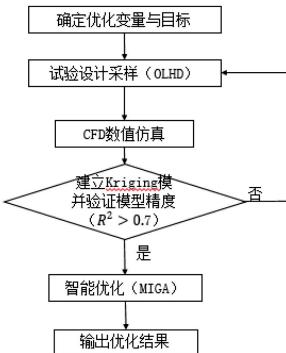


图 7 鸭尾和扩散器 DOE 优化流程

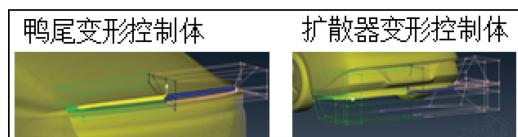


图 8 鸭尾和扩散器的变形控制体

通过拉丁超立方的方法对特征变量取值得到样本点，应用 CFD 计算得到各个样的风阻结果。根据所取样本点计算得到的风阻结果进行克雷金代理模型建立，并进一步根据多岛遗传算法得到最优解。在该流程下得到的最优解及鸭尾和扩散器取值如图 9 所示。

优化结果		
H1/mm	H2/mm	风阻结果/C <sub>d</sub>
10	14	0.222

图 9 DOE 智能优化结果

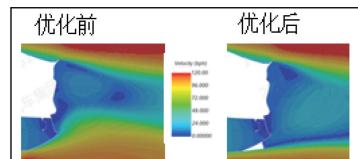


图 10 车尾部优化前后流场对比图

通过 CFD 计算和 DOE 智能优化，得到了风阻系数较小且更符合造型和工程要求的设计，且在成本框范围之内。通过图 10 车尾部优化前后流场对比图可以看出，鸭尾和扩散器优化之后一方面使得车尾后风窗区域气流流速降低，后风窗区域背压恢复变好；同时后风窗下洗气流会在鸭尾末端果断分离，减小了气流在车尾钣金表面流速，有利于整个车尾处的背压恢复。鸭尾和扩散器优化之后，风阻降低 12count，且在成本框定义范围以内。

### 3.2.4 前轮扰流板优化

增加前轮扰流板是降低风阻常用的设计，前轮扰流板设计要满足最小离地间隙和车辆接近角，如图 11 所示在满足工程范围内适当的调整扰流板的 Z 向的高度可以快速地降低风阻。

相对于高度为 65mm 的前轮扰流板，高度减小至 20mm，从图 12 前轮附近优化前后压力系数对比图可以看出，一定

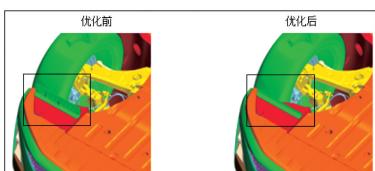


图 11 前轮扰流板优化前后高度对比图

程度上减小了扰流板对来流的阻挡，减小了前轮扰流板前方及下护板局部区域正压区，有利于气流加速流过下车体；通过优化前轮扰流板的高度，风阻降低 10count。

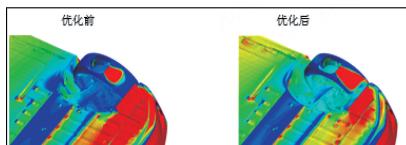


图 12 前轮附近优化前后压力系数对比图

进一步对前轮扰流板的形状进行优化，从原来的竖版形状改为 3D 结构，如图 13 所示。

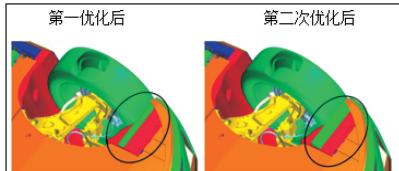


图 13 前扰流板优化前后形状变化

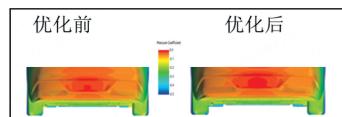


图 14 优化前后尾部压力系数对比图

将竖直的前轮扰流板优化为弧形 3D 状，相同的高度条件下，从图 14 优化前后尾部压力系数对比图可以看出，3D 扰流板能一定程度引导更多气流向车轮后方流动，使得前轮扰流板区域的正压区相对较小；同时进一步减少了车轮区域产生的湍流流动损失；前轮扰流板区域的流动损失减小，有利于车尾背压恢复。通过形状的优化，前轮扰流板又降低了 2count，且弧形设计可以直接融合在挡泥板上，零成本实现了降阻 10count，节约了竖版导流板的零件成本，降低了整车成本。

### 3.2.5 后视镜镜柄优化

后视镜影响风阻主要在于后视镜镜体的型面和镜柄的设计。在优化完镜体的型面后，本研究又对镜柄进行了优化，如图 15 所示，在满足线束等安装及整个后视镜刚度强度的要求下，对镜柄进行了减厚优化。

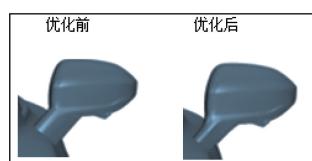


图 15 后视镜优化前后镜柄厚度对比图

后视镜镜柄缩小，从图 16 后视镜处优化前后湍动能对比图可以看出，一定程度减少了气流对后视镜镜柄的冲击；同时，后视镜镜柄的缩小也有效改善了后视镜后方的拖体大小及能量损失，该方案降低 1count，且不额外增加成本。

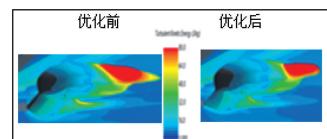


图 16 后视镜处优化前后湍动能对比图

### 3.2.6 后下护板优化

下护板是纯电动轿车降低风阻的常用设计，在满足离地间隙、下装安装包络、底盘附件运动包络等的前提下，如图 17 所示，增加下护板的覆盖度可以更好地降低风阻。

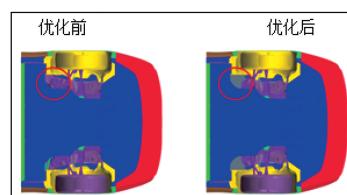


图 17 下护板增加覆盖面积前后对比图

从图 18 优化前后湍动能对比图可以看出，增加后下护板面积能阻挡后轮后方和侧方气流冲击到后车体内部，一定程度上改善了车底气流的通过性；车底气流加速流动能有效提高背压恢复，通过该措施降低了风阻 3count，且在原下护板成本框以内。

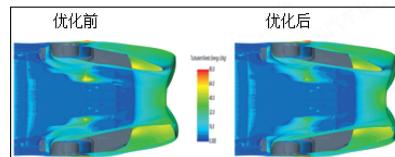


图 18 优化前后湍动能对比图

该款纯电轿车通过对以上方案的优化验证输出优化方案，通过造型、工程可行评估之后，并进行了成本的分析，成本的结果如下表所示。含已实施并优化的主动进气格栅(AGS)、低开口率高平整度的超低风阻轮毂、全包覆的下护板等。

表 6 降低风阻的效果与成本

序号	优化区域	降阻效果 /count	成本/(元/车)	成本/(元/count)
1	机罩下压	3	0	0
2	前保险杠两侧	1	0	0
3	后视镜	1	0	0
4	下护板优化	3	0	0
5	前扰流板	10	0	0
6	全覆盖底护板	33	123	3.7
7	主动进气格栅	18	122	6.8

(续)

序号	优化区域	降阻效果/ count	成本/ (元/车)	成本/ (元/count)
8	鸭尾 & 扩散器	12	90	7.5
9	超低风阻轮毂	25	240	9.6

通过对以上方案的优化，整车风阻系数达成  $0.21C_d$  的目标，且机罩下压、前保险杠两侧优化、后视镜优化、前轮扰流板优化、下护板继续优化等是不额外增加成本的，且因为前轮扰流板和挡泥板集成一体，反而节约了该件的零件成本。而全覆盖下护板、主动进气格栅、鸭尾和扩散器优化、超低风阻轮毂等方案是增加成本的方案，且每降低 1 count 对应的成本也不同，但整体成本均在项目成本框以内。在通过仿真优化的技术达成了风阻性能目标后，下一步进行油泥模型风洞试验验证。

#### 4 整车低风阻试验验证

整车油泥模型风洞试验是验证仿真优化方案有效性、判定整车风阻达标的主要途径之一。在经过 CFD 仿真优化后，本研究又采用了全尺寸油泥模型风洞试验的方法进行了验证。如图 19 所示为机罩和前保险杠两侧验证方案，如图 20 所示为鸭尾与扩散器验证方案，如图 21 所示为扰流板、后视镜、下护板验证方案。



图 19 机罩与前保险杠两侧验证方案



图 20 鸭尾与扩散器验证方案



图 21 扰流板、后视镜与下护板验证方案

通过以上等最优方案的综合验证，全尺寸油泥模型的风洞试验结果 ( $0.209C_d$ ) 与仿真优化结果 ( $0.206C_d$ ) 偏差较小，仿真精度在 2% 以内，同时达成了整车风阻性能目标。

#### 5 结论

本文通过对某款纯电动轿车低风阻性能开发的气动、造型、工程及成本多方协同开发流程、风阻性能开发技术等进行了详细说明，并从机罩、前保险杠、鸭尾和扩散器、扰流板、后视镜和下护板等进行了降阻原理分析，其中对于风阻有相互影响的特征要素进行了 DOE 优化，能较好地找到优化设计方案。通过对前扰流板的优化实现了降阻、降成本的结合，既实现了低风阻目标又降低了车型成本。本文还对 CFD 仿真结果通过风洞试验方法进行了验证，仿真误差控制在 2% 以内，高精度气动仿真技术可支持今后的整车气动性能设计方案的优化分析。

通过本研究，确立了此车型的最优气动性能设计方案，风阻性能优越，工程可行，成本可控，获得优异的效果。随之确立的基于全流程优化的纯电轿车低风阻性能开发方法，为后续纯电车型的低风阻性能开发提供有力的技术支撑。

#### 参 考 文 献

- [1] 公安部办公厅统计处. 2022 年全国机动车和驾驶人统计分析 [J]. 公安研究, 2023 (2): 91-92.
- [2] 余志生, 汽车理论 [M], 5 版. 北京: 机械工业出版社 2009.
- [3] 王庆洋, 黄文鹏, 赖晨光, 等. 基于气动附件的重型货车空气动力学减阻研究 [J]. 汽车工程, 2020, 42 (6): 746-752.
- [4] 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.
- [5] 罗秋丽, 张风利, 张荣荣, 等. 比亚迪汉空气动力学开发 [J]. 汽车工程学报, 2020, 10 (6): 399-406.
- [6] 袁志群, 谷正气, 何忆斌, 等. 汽车底部结构对气动特性影响的数值仿真与试验研究 [J]. 系统仿真学报, 2010, 22 (8): 1832-1836.
- [7] 刘学龙, 闫晓晓, 黄森仁. 汽车底部流场对空气阻力性能影响的研究 [J]. 新型工业化, 2015, 5 (3): 35-41.
- [8] 李林, 林强, 陈建超, 等. 基于 STAR-CCM+ 的某款轿车降阻优化研究 [J]. 汽车技术, 2016 (9): 4-8.