

基于自适应模拟退火优化算法的车轮阻风板降阻分析*

古静 陈亿 杜亚非 黄维杰 张全周 王庆洋

(中国汽车工程研究院股份有限公司,重庆 401122)

【摘要】为高效优化汽车底部流场和降低整车气动阻力,本文以某纯电车型为研究对象,提出一种多变量联合全局寻优方法。首先,考虑车辆限位装置夹具的影响,应用计算流体动力学仿真和风洞试验相结合的方法,验证初始方案的有效性和分析方法的可靠性;然后,基于试验设计、代理模型和自适应模拟退火算法,应用两种优化方案降阻:前轮阻风板寻优和前后轮阻风板联合寻优;最后进行风洞试验验证。试验结果表明,前轮阻风板多变量寻优降阻效果最佳,较原模型降阻5.5%。

关键词:降阻优化 全局寻优 计算流体动力学仿真 风洞试验 自适应模拟退火

中图分类号:U461.1 **文献标志码:**A **DOI:** 10.19620/j.cnki.1000-3703.20241010

Analysis on Aerodynamic Drag Reduction of Vehicle Wheel Deflector Based on ASA Optimization Algorithm

Gu Jing, Chen Yi, Du Yafei, Huang Weijie, Zhang Quanzhou, Wang Qingyang

(China Automotive Engineering Research Institute Co., Ltd., Chongqing 401122)

【Abstract】In order to optimize the underbody flow field of vehicle efficiently and reduce aerodynamic drag, this paper takes a electric vehicle as the research object, and proposes a multivariate joint global optimization method. Firstly, considering the influence of RPR fixtress, the method which combines CFD simulation and wind tunnel test is applied to verify the effectiveness of the initial optimization scheme and the reliability of the analysis method; Then, based on DOE, surrogate model and ASA algorithm, two optimization schemes are used to reduce aerodynamic drag: optimization of front wheel deflector, and joint optimization of front and rear wheel deflector. Finally, wind tunnel tests are conducted for verification. The test results show that, multivariate optimization of front wheel deflector has the best drag reduction effect, the drag coefficient of the optimal scheme is reduced by 5.5% compared to the original model.

Key words: Aerodynamic optimization, Global optimization, Computational Fluid Dynamics (CFD) simulation, Wind tunnel test, Adaptive Simulated Annealing (ASA)

【引用格式】古静,陈亿,杜亚非,等.基于自适应模拟退火优化算法的车轮阻风板降阻分析[J].汽车技术,2025(6):54-62.

GU J, CHEN Y, DU Y F, et al. Analysis on Aerodynamic Drag Reduction of Vehicle Wheel Deflector Based on ASA Optimization Algorithm[J]. Automobile Technology, 2025(6): 54-62.

1 前言

近年来,国内外专家学者对车轮降阻的研究日趋完善,主要通过车轮本身优化和在轮罩上增加阻风板等方法对车轮周围的气流进行有效梳理,而在轮罩上增加阻风板是近年来车轮降阻各类研究中最重要也是最具性价比的方向。综合 Andreas Kremheller^[1]和 Simone^[2]的研究发现,合适的前轮阻风板形状和位置可使降阻效果达

到最优,且简单的矩形形状是最有效且经济的解决方案。王夫亮^[3]、贾青^[4]和李蛟^[5]研究了前轮阻风板高度对整车风阻性能的影响规律。随着研究的逐步深入,专家学者们开始聚焦于阻风板多个设计变量对整车风阻性能的影响规律及降阻机制探索。综合陆润明^[6]、周建川^[7]、李冠群^[8]的研究得出阻风板遮挡轮胎Z向高度和Y向宽度是最为关键的因素。

以上研究成果大多基于计算流体动力学(Computa-

*基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFE0208000)。

通信作者:张全周(1991—),男,博士,研究方向为整车风阻风噪性能正向开发,zhangquanzhou@caeri.com.cn。

tional Fluid Dynamics, CFD)分析的方法进行阻风板降阻研究,并且依靠经验进行阻风板优化方案制作及验证分析,未提前考虑风洞中车辆限位装置(Rocker Panel Restraint, RPR)夹具对方案贡献量的影响,存在优化盲目性和低效性,难以确保优化方案能达到实测最优。

为解决上述问题,本文首先在分析模型中加入RPR夹具,应用CFD仿真分析和风洞试验相结合的方法,验证某纯电轿车初始方案的有效性和仿真分析精度。在初始方案的基础上,应用试验设计、代理模型和自适应模拟退火(Adaptive Simulated Annealing, ASA)算法相结合的方法,提出单部位多变量和多部位多变量联合寻优方法,并在风洞试验中验证了该方法的可靠性和有效性,为阻风板的自动化寻优设计提供了参考。

2 仿真模型建立

2.1 整车模型与计算域建立

本文以某纯电轿车为研究对象,去除模型中对整车气动性能影响较小的内部区域,如乘员舱、电池包等,保留造型、发动机舱内零部件、底盘、电池包表面等整车全细节结构,以取得节约计算资源和提高计算准确性的平衡,整车模型搭建如图1所示。

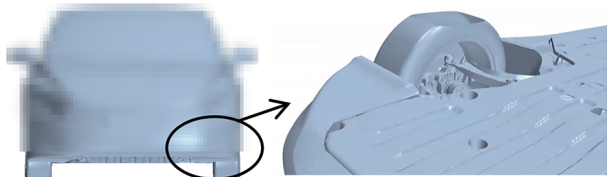


图1 整车几何模型

通过在整车模型外部建立矩形域来模拟风洞试验区域,根据空气动力学学会团体标准 T/CSAE 112—2019^[9]中计算域推荐尺寸进行计算域设置,如图2所示。

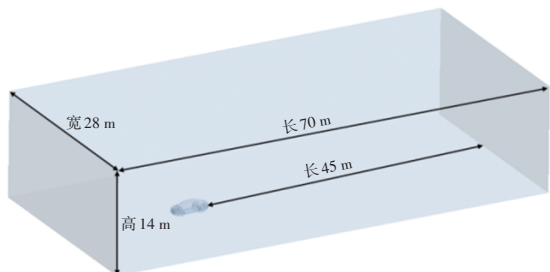


图2 计算域设置

2.2 网格模型设定

为更好捕捉车体周围重要流场信息,根据空气动力学学会团体标准 T/CSAE 112—2019^[9]定义部件面网格尺寸,车体周围加密区的位置及网格尺寸设置如表1所示。结合工程实践经验设置边界层网格,机舱及底盘等流速较低部件,边界层网格设为1层,厚度为1 mm;车

身外表面、底护板、前轮阻风板等气流流速较高部件,其附近气流速度梯度较大,边界层网格设置5层,首层厚度为0.8 mm,边界层总厚度为8 mm。体网格选取 Trimmer,生成的体网格数约为6 000万个。

表1 加密区网格设置

加密区域	推荐尺寸/mm
格栅、A柱、尾柱、后视镜、后保、行李箱盖、底盘	8
车前及车侧面0.5 m,车后5 m,车高0.5 m区域	16
车前及车侧面1 m,车后8 m,车高1.5 m区域	64
车前及车侧面2 m,车后12 m,车高3.5 m区域	128

2.3 计算边界条件设定

2.3.1 流动控制方程

考虑整车外流场为三维定常、不可压缩和湍流流动,控制方程组描述如下:

质量守恒方程(连续性方程):

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

式中: u 、 v 、 w 分别为流体速度在 x 、 y 、 z 方向上分量。

动量守恒方程:

$$\begin{cases} \rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho \operatorname{div}(uu) = \operatorname{div}(\mu \cdot \operatorname{grad} u) - \frac{\partial p}{\partial x} + S_u \\ \rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho \operatorname{div}(vu) = \operatorname{div}(\mu \cdot \operatorname{grad} v) - \frac{\partial p}{\partial y} + S_v \\ \rho \frac{\partial w}{\partial t} + \rho \operatorname{div}(wu) = \operatorname{div}(\mu \cdot \operatorname{grad} w) - \frac{\partial p}{\partial z} + S_w \end{cases} \quad (2)$$

式中: ρ 为密度, t 为时间, μ 为动力粘度, p 为压强, S_u 、 S_v 、 S_w 为动量方程的广义源项。

2.3.2 湍流方程

结合梁建永等^[10]和王庆洋等^[11]关于湍流模型选取的研究成果,本文选用 Realizable k - ε 湍流模型。湍流方程组描述如下^[12]:

$$\begin{cases} \rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho \nabla \cdot (k\bar{v}) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho(\varepsilon - \varepsilon_0) + S_k \\ \rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho \nabla \cdot (\varepsilon\bar{v}) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \frac{1}{T_e} C_{\varepsilon 1} P_\varepsilon - C_{\varepsilon 2} f_2 \rho \left(\frac{\varepsilon}{T_e} - \frac{\varepsilon_0}{T_0} \right) + S_\varepsilon \end{cases} \quad (3)$$

式中: k 为湍动能, ε 为湍动能耗散率, ε_0 为环境湍动能耗散率, \bar{v} 为平均速度, μ 为动力粘度, μ_t 为湍流涡流粘度, σ_k 、 σ_ε 、 $C_{\varepsilon 1}$ 和 $C_{\varepsilon 2}$ 为模型系数, f_2 为阻尼函数, S_k 和 S_ε 为自定义源项, P_k 和 P_ε 为结果项, T_0 为环境时间尺度, T_e 为大涡时间尺度。

2.3.3 边界条件设置

整车模型分析边界条件设置如表2所示。冷却系

统的阻尼特性参数设置如表3所示。

表2 边界条件设置

关键部位	边界名称	边界类型	设定值
计算域	入口	速度入口	120 km/h
	出口	压力出口	0 Pa
	侧面、顶面、车前后地面区域	壁面	滑移
	移动带区域	壁面	(120,0,0)km/h
车轮	轮胎	旋转速度	(120,0,0)km/h
模型表面	其他壁面	壁面	固定

表3 冷却模块阻尼特性设置

部件	惯性阻力系数/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-4}$	粘性阻力系数/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-4}$
散热器	161.4	524.9
冷凝器	457.6	275.3

3 仿真分析及试验验证

3.1 仿真分析

首先,根据车轮位置及轮罩造型,结合 Andreas Kremheller^[1]、Simone^[2]和周建川^[7]等研究成果,在轮罩防飞溅板末端增加矩形阻风板,内侧宽度遮挡轮胎,具体尺寸及安装位置如图3所示。

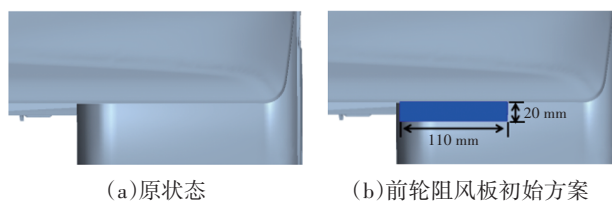


图3 前轮阻风板方案布置

壁面首层网格厚度对数值计算的精度有重大影响,在CFD分析中,常用壁面 $y+$ 值衡量首层网格厚度设置是否合理。 $y+$ 值表征边界层中首层网格节点到壁面的无量纲距离,不同湍流模型对 $y+$ 值的要求不同。研究表明^[13],对Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型,车体表面 $y+$ 值低于300即满足工程精度需求。

对原状态(无前轮阻风板)和前轮阻风板初始方案分别进行整车风阻仿真分析计算,并查看整车壁面 $y+$ 值,得到壁面 $y+$ 值分布结果和整车风阻分析结果,如表4和表5所示。表4结果表明,两种方案状态的壁面 $y+$ 值均低于300,表明CFD计算结果满足工程精度需求,进一步说明湍流模型选取和近壁区域的处理方式是可行的。表5结果表明,增加前轮阻风板后,整车风阻系数 C_d 降低了0.008。

有无前轮阻风板的阻力系数累积力发展曲线对比结果如图4所示。优化状态下,图示A前区域为阻风板前端,累积阻力系数较原状态增大;进入前轮罩区域后,

累积阻力系数趋势相当;图示B-C区域为前轮心后端到前轮罩后端区域,优化状态下的累积阻力系数开始明显低于原状态;图示D后区域为后轮罩前端往后区域,优化状态下的累积阻力系数与原状态的差距减小。

表4 壁面 $y+$ 值分布结果

方案状态	壁面 $y+$ 值	$y+$ 值目标值
原状态	0~224.2	<300
前轮阻风板初始方案	0~265.2	

表5 整车风阻分析结果

方案状态	整车风阻系数	风阻系数变化值
原状态	0.27	参考值
前轮阻风板初始方案	0.262	-0.008

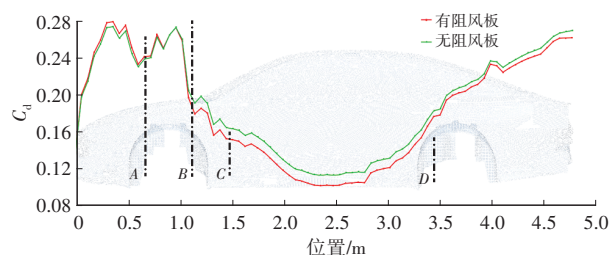
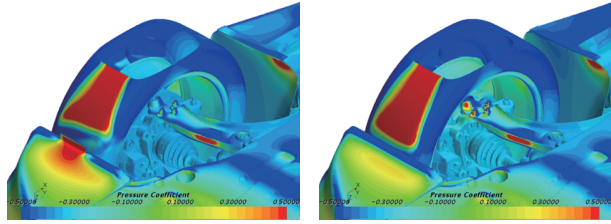


图4 阻力系数累积力发展曲线

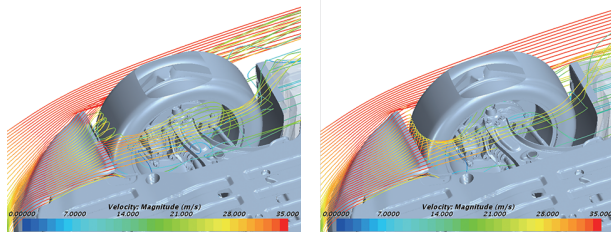
图5为前轮腔周边区域的压力系数云图,图6为前方气流在前轮腔周边的速度流线图,图7为前轮阻风板Y向中截面速度云图。对比两种方案结果可知:优化状态下,黑色椭圆虚线框内,高速气流直接冲击阻风板,使阻风板及其前方的防飞溅板形成滞止气流,在其表面形成高压区,为造成图4所示前端A点累积阻力系数增加的本质原因;高速气流冲击前轮阻风板后,使得本该流向车轮正面的气流沿阻风板向两侧扩散,大大减少直接冲击到车轮正面的气流,且直接冲击车轮正面的气流是沿着阻风板下端,呈向下的弧形趋势冲击轮胎迎风面,使轮胎上气流直接冲击点偏下,冲击点上移高度较低,导致轮胎正面高压区覆盖面积明显减小,使优化状态下,阻风板到轮心前部区域阻力系数减小。综合来看,图4所示前轮心前端B点累积阻力系数与原状态相当。优化状态下,直接冲击轮胎的气流减少,轮胎旋转作用下卷入轮胎内侧空腔的气流减少,挤压轮胎后侧形成的回流涡尺度减小,且车轮两侧更多的气流往车身侧向后流动,侧裙下侧前端负压区明显减小,压差阻力明显降低,导致图4所示轮罩后侧C点累积阻力系数与原状态相比明显降低。

图8为后轮腔周边的速度截面云图,图9为后轮腔周边压力系数云图,对比优化前后轮腔周边流场信息可知:优化状态下,前方外侧高速气流相对靠近轮胎中截面,底部中间高速气流相对靠近轮胎内表面,造成后悬架、后轮胎迎风面高压区覆盖面积明显增加,增加该区

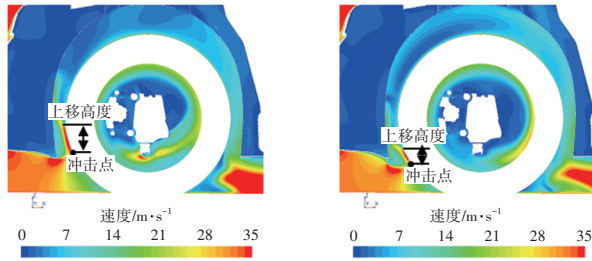
域的压差阻力,最终导致图4所示后轮罩前侧D点及以后区域两个方案的累积阻力系数差值有减小,但综合来看优化方案整体风阻系数都低于原状态。



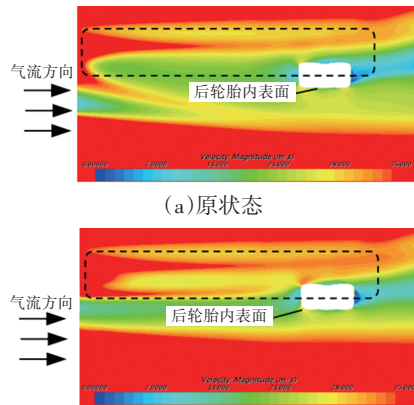
(a)原状态 (b)前轮阻风板初始方案
图5 前轮腔压力系数云图



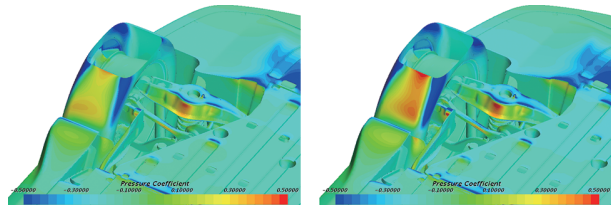
(a)原状态 (b)前轮阻风板初始方案
图6 前轮腔周边速度流线图



(a)原状态 (b)前轮阻风板初始方案
图7 阻风板Y向中截面速度云图



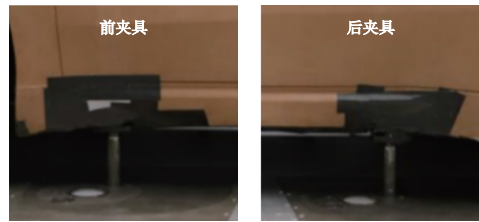
(a)原状态 (b)前轮阻风板初始方案
图8 后轮腔Z=0.05 m截面速度云图



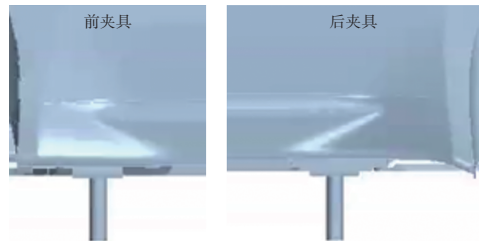
(a)原状态 (b)前轮阻风板初始方案
图9 后轮腔压力系数云图

3.2 前轮阻风板影响区域分析

根据图4,前轮阻风板的增加会导致前轮心后侧和后轮心前侧区域流场特性发生显著改变,而RPR夹具和后轮阻风板刚好位于该区域,因分析RPR夹具和后轮阻风板对整车风阻性能的影响。图10为RPR夹具现场图,以及根据夹具扫描数据及安装位置还原出的模型图,图11为后轮阻风板初始方案布置图,各方案状态下整车风阻系数计算结果如表6所示。从对比结果可知,无前后轮阻风板时,夹具对整车风阻系数几乎无影响,但有阻风板时,夹具的存在会不同程度的增大风阻,并且后轮阻风板初始方案在有夹具时无降阻效果。因此在进行整车降阻优化时,需要考虑RPR夹具对方案贡献量的影响。



(a)RPR夹具现场



(b)RPR夹具模型

图10 RPR夹具示意

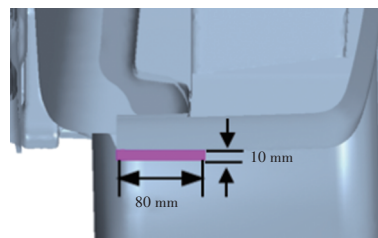


图11 后轮阻风板初始方案布置

表6 整车风阻分析结果

方案状态	整车风阻系数		RPR影响
	无RPR	有RPR	
原状态	0.27	0.27	0
前轮阻风板初始方案	0.262	0.264	+0.002
前+后轮阻风板初始方案	0.260	0.264	+0.004

从12所示的累积阻力系数发展曲线可知,考虑RPR夹具的影响下,有无后轮阻风板时,整车风阻系数发展情况相当,初始后轮阻风板无明显降风阻效果。

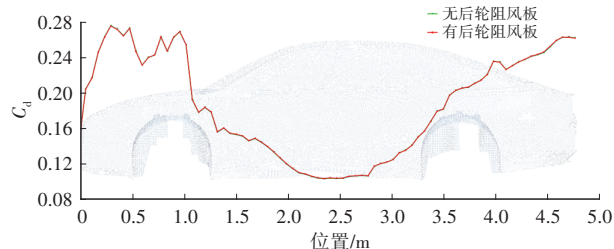


图12 阻力系数累积力发展曲线

图13为后轮腔周边区域的压力系数云图,对比两种方案结果可知:有后轮阻风板状态下,轮胎正面高压区覆盖Z向高度略有降低,Y向宽度略有增加,与黑色虚线所示的无后轮阻风板高压区覆盖面积相比,两者总覆盖面积相当,表明初始后轮阻风板无明显降阻效果。

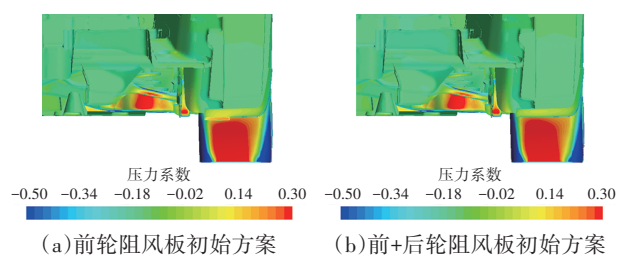


图13 后轮腔压力系数云图

3.3 试验验证

本次针对阻风板相关优化方案的验证试验均在某公司的整车气动声学风洞中进行,试验方法按照空气动力学学会团体标准T/CSAE 146—2020^[14]进行,中央移动带和车轮移动带以120 km/h速度运行,开启切向吹气和边界层抽吸系统。

油泥模型通过RPR夹具固定在试验天平上,并根据设计状态下前后轮眉高度进行车身姿态调整,准备就绪后,油泥模型阻风板方案在风洞中如图14所示。



(a)前轮阻风板初始方案



(b)后轮阻风板初始方案

图14 风洞试验现场图

原状态与前后轮阻风板初始方案仿真与试验对标结果如表7所示,由对标结果可知,两个工况计算误差较小,均控制在3%以内,满足车企仿真分析精度要求,表明网格模型、边界条件以及湍流模型的选取和参数设置是合理的,仿真分析可以获得比较准确的流场信息,计算结

果具有较高的可信度。经风洞试验验证,前轮阻风板初始方案使整车风阻系数降低0.012,降阻效果显著。

表7 仿真与试验对标结果

方案状态	整车风阻系数		计算误差	误差要求
	仿真值	试验值		
原状态	0.27	0.271	0.4%	≤3%
前+后轮阻风板初始方案	0.264	0.259	1.9%	

4 自动化全局寻优及试验验证

4.1 自动化全局寻优流程

为了考察优化部位选取对全局寻优结果的影响,本次优化设计了两种优化方案:方案一为仅对前轮阻风板的设计变量进行全局寻优;方案二为对前轮和后轮阻风板的所有设计变量同时进行全局寻优。全局寻优流程如下所述:

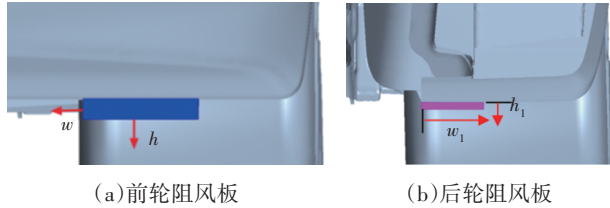
首先,定义设计变量、变量变化范围,样本点数,按照合适的实验设计制定优化方案,再根据方案中设计变量的不同组合完成整车风阻优化模型的建立。接着,应用CFD方法进行整车风阻优化模型的计算,得到设计变量不同组合方案下的响应值。然后,研究设计变量对响应的规律,建立代理模型,并基于代理模型进行全局自动寻优。最后,通过风洞试验验证联合全局寻优方法的可行性。

4.2 试验设计

试验设计(Design of Experiments, DOE)是一种数理统计方法,是代理模型的取样策略,直接决定了代理模型的构建精度。常用的DOE方法有全因子设计、正交试验设计、拉丁超立方设计等,拉丁超立方是一种高效的采样方法,可用较少的样本点获得大量模型信息,因此本文选用拉丁超立方方法进行试验设计^[15]。

根据图7的阻风板Y向中截面速度云图,可知将阻风板布置在轮罩前下方,即高速气流中心区,可有效减少直接冲击轮胎和卷入轮腔的气流,实现有效降阻的目的。结合图5和图6流场信息可知,经初始前轮阻风板导向内侧的高速气流冲击到轮罩后端,造成该处有明显高压区覆盖,与初始阻风板Y向距离125 mm,因此选取前轮阻风板内侧加宽为优化方向,125 mm为内侧加宽最大值;结合图13流场信息可知,经初始后轮阻风板导向外侧的气流增加了后轮胎迎面面的高压区覆盖宽度,宽度约160 mm,因此选取后轮阻风板外侧加宽为优化方向,160 mm为后轮阻风板宽度的最大值。考虑总布置给出的行驶通过性要求,选取前轮阻风板高度增量最大值为30 mm,后轮阻风板高度最大

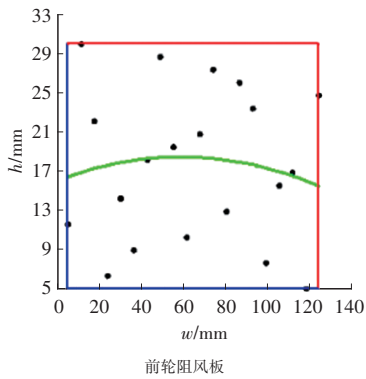
值为 30 mm。结合轮罩造型和上述流场解析,本文选取如图 15 所示的前轮阻风板高度增量 h 和内侧宽度增量 w 、后轮阻风板高度 h_1 和宽度 w_1 作为设计变量,整车风阻系数 C_d 值最小化为目标函数,设计变量范围如表 8 所示。



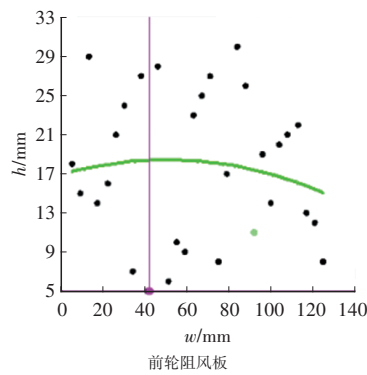
(a)前轮阻风板 (b)后轮阻风板

图 15 设计变量定义示意图

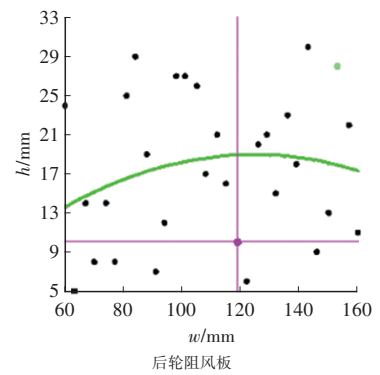
方案一:在前轮阻风板变量范围中选取 20 组样本



(a)方案一



前轮阻风板

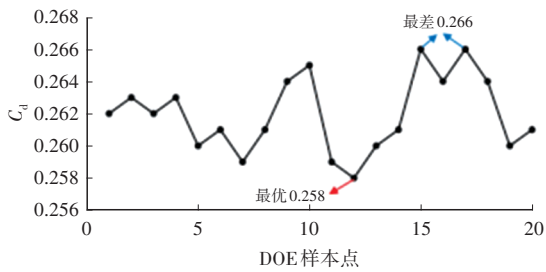


后轮阻风板

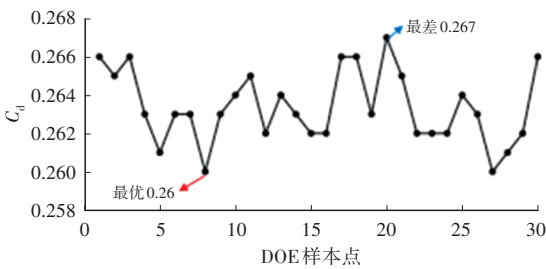
(b)方案二

图 16 样本点空间分布情况

根据选取的样本点,建立整车风阻优化模型,并利用 CFD 仿真计算的方法得到所有样本点的整车风阻系数,获取设计变量与响应之间的关系,为后续构建近似模型提供依据。两种方案所有样本点的设计变量与响应值如下图 17 所示。



(a)方案一



(b)方案二

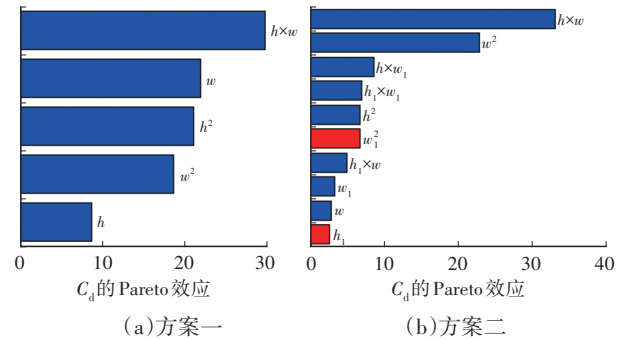
图 17 设计变量及其响应值

点进行试验设计;方案二:在前后轮阻风板变量范围中选取 30 组样本点进行试验设计。从图 16 中样本点的分布情况可知,两种方案的样本点在取值区间内都均匀分布,无明显集中现象,最大程度地保障了试验结果的精度。

表 8 设计变量范围

优化部位	设计变量	变量范围/mm	目标函数
前轮阻风板	内侧宽度增量 w	[5,125]	C_d 最小化
	高度增量 h	[5,30]	
后轮阻风板	宽度 w_1	[60,160]	
	高度 h_1	[5,30]	

图 18 为阻风板各变量的 Parato 图,该图反映了样本拟合后模型中设计变量 w 、 h 、 w_1 、 h_1 对响应 C_d 的影响程度百分比。蓝色表示正效应,红色则表示负效应。结果表明,方案一前轮阻风板所有设计变量均呈正效应,即在给定参数范围内 C_d 值均随着高度或宽度的增加而降低,其中,高度和宽度同时变化 $h \times w$ 对整车风阻系数的影响最大为 29.8%,其次是 w 为 22%;方案二后轮阻风板宽度 w_1^2 和高度 h_1 呈负效应,其他变量为正效应,对整车风阻系数影响最大的仍然是 $h \times w$ 为 32.9%,其次是 w^2 为 22.8%。



(a)方案一

(b)方案二

图 18 Pareto 图

主效应主要反映单个变量对响应的影响特性,如图

19所示。结果表明:在参数范围内,方案一的前轮阻风板高度和宽度对整车风阻系数的影响呈非线性关系,表现为随着高度或宽度的增加,整车风阻系数均先减小后增加,在取值范围内整车风阻系数存在极小值,结合图18可知,前轮阻风板高度和宽度存在较大的交互效应,并且宽度对整车风阻系数的影响比高度大;方案二前轮阻风板高度和宽度对整车风阻系数的影响与方案一一致,后轮阻风板高度对整车风阻系数的影响呈单调递减关系,但随着宽度的增加,整车风阻系数呈先增加后减小的趋势,结合图18可知,前后轮阻风板高度间、宽度间不存在交互效应,但宽度和高度间存在交互效应,并且宽度的影响同样比高度大。

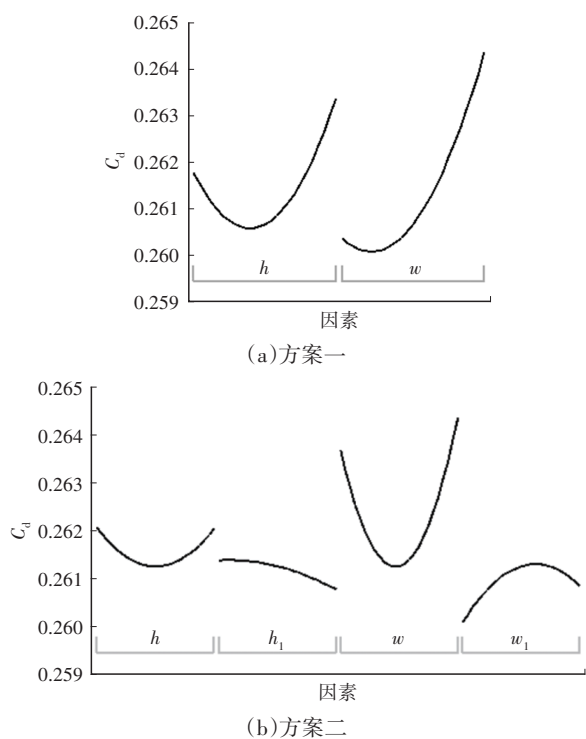


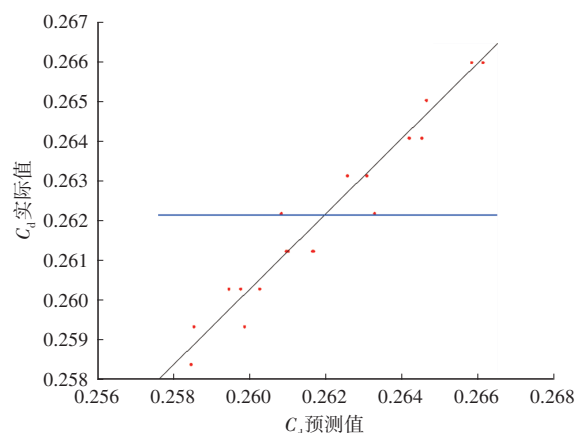
图19 主效应图

4.3 代理模型与自动寻优

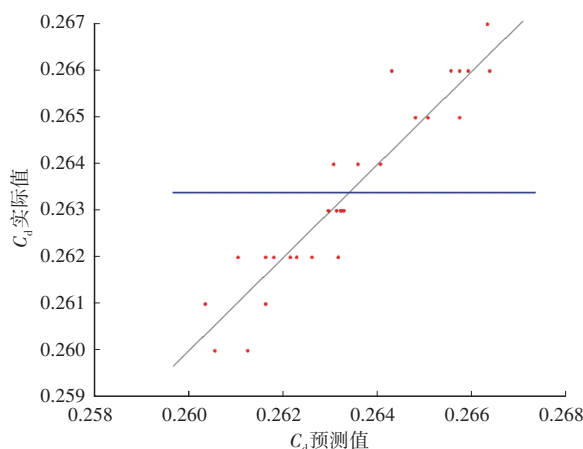
代理模型是基于少量样本点的响应值计算结果,构建的一种所有设计变量与响应值之间关系的数学模型,其预测值与CFD分析结果相当,可解决优化过程中大量CFD优化分析造成的计算成本过高的问题。常用的代理模型有响应面模型、Kriging模型、神经网络模型和径向基函数模型,鉴于Kriging模型是一种估计方差最小的无偏估计模型,本文选取Kriging模型建立阻风板高度、宽度与风阻系数关系的数学模型。

为了校验代理模型的精度,使用拟合精度系数 R^2 来进行误差分析。图20为kriging代理模型散点图,方案一的样本点离等值线较近, R^2 为0.941,方案二的样本点离等值线相对偏远, R^2 为0.902,但均满足 $R^2 > 0.9$ 的精度

要求,表明建立的kriging代理模型精度较高,可用于整车风阻系数的进一步寻优。



(a)方案一



(b)方案二

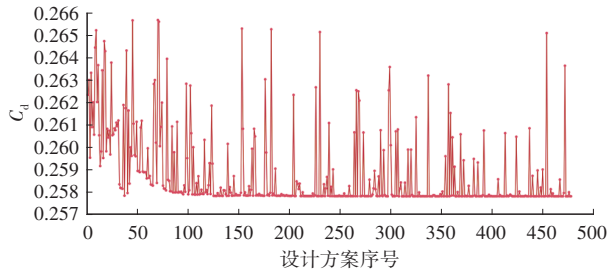
图20 Kriging模型散点图

目前常用的探索优化算法主要有传统遗传算法、多岛遗传算法、粒子群算法、模拟退火算法等。自适应模拟退火算法来源于模拟退火算法,具有自适应性特点,即在算法执行过程中,能根据当前的搜索状态,自适应地调整参数和策略,提高全局优化能力^[16]。该算法能以最小的成本就获得全局最优解,因此本文选用自适应模拟退火算法对建立的近似模型进行全局寻优。设定最大优化迭代数为2000次,方案一经过478次迭代得到全局最优解,方案二经过1247次迭代得到最优解,寻优过程如图21所示。将预测的最优解通过CFD计算验证,对比结果如表9所示。结果表明,两种方案代理模型的预测精度相当,基于kriging模型和ASA算法进行整车风阻系数全局寻优具有工程可行性,并且单变量的全局寻优结果有优于多变量的可能性,因此建议存在相关性的变量先按照从前往后,逐步增加变量的方式进行全局寻优,增加最优解的可靠性。

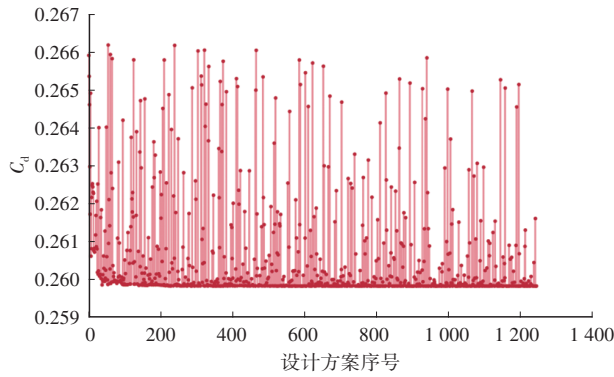
4.4 最优方案分析

优化前后底部流场对比如图22所示。与初始方案

相比,最优方案内侧高速气流相对远离轮胎内侧面,在轮胎旋转作用下卷入轮腔及轮辐空腔的气流减少,前轮后的气流并未直接冲击 RPR 夹具,有利于减小高压区覆盖面积,利于降阻。



(a)方案一



(b)方案二

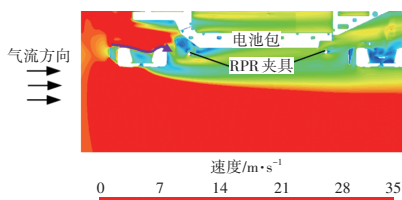
图 21 寻优结果示意图

表 9 预测结果与计算结果对比

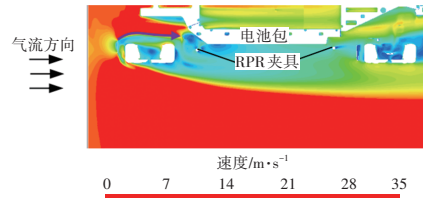
方案状态	设计变量值/mm	整车风阻系数		预测误差/%
		预测值	仿真值	
方案一最优	$w=38, h=27;$ $w_1=80, h_1=10$	0.258	0.257	0.4
方案二最优	$w=86, h=10;$ $w_1=148, h_1=124$	0.260	0.258	0.8

4.5 试验验证

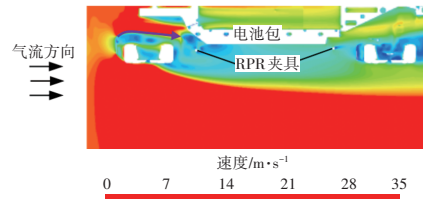
为验证优化流程的预测精度,将基于代理模型进行全局寻优得到的最优方案在风洞试验中进行了实测。试验现场如图 23 所示,预测值与试验值对标结果如表 10 所示。结果表明,优化流程预测最优与风洞试验结果最大相差 0.8%,方案一最优整车风阻系数较初始方案进一步降低 0.003,方案二并未进一步降低,表明前轮阻风板单独寻优降阻效果更好,进一步验证单部位多变量和多部位多变量联合寻优的可靠性及准确性。



(a)初始方案

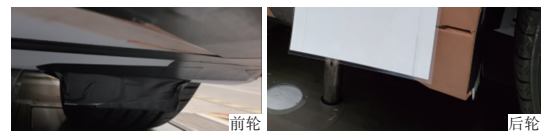


(b)方案一最优

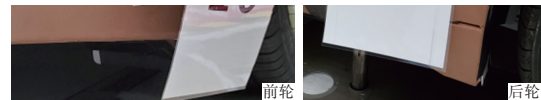


(c)方案二最优

图 22 底部速度云图(Z=0.15 m截面)



(a)方案一最优



(b)方案二最优

图 23 方案试验现场

表 10 预测结果与试验结果对比

方案状态	整车风阻系数		预测误差/%
	预测值	试验值	
方案一最优	0.258	0.256	0.8
方案二最优	0.26	0.259	0.4

5 结束语

本文提出了一种改进的快速有效的汽车降阻优化方法,即单部位多变量和多部位多变量联合全局寻优,提升了全局最优解的可靠性和高效性,在整车气动性能开发中具有显著的工程应用价值。从多工况整车风阻仿真分析和风洞试验结果的对标情况看,计算误差最高为 1.9%,低于工程允许的误差要求 3%,并且引入 RPR 夹具的影响后,优化方案降阻量的计算误差有一定程度的降低,建议将 RPR 夹具引入整车风阻性能开发流程中。通过前轮阻风板单独寻优和前后轮阻风板全局寻优方式的结合,发现前轮阻风板单独寻优的降阻效果最佳,经风洞试验验证,最优方案较原模型降阻 5.5%。

参考文献

- [1] KREMHELLER A . The Aerodynamics Development of the New Nissan Qashqai[J]. SAE Technical Paper, 2014.
- [2] SEBBEN S . Numerical Simulations of a Car Underbody: Effect of Front-Wheel Deflectors[J]. SAE Paper, 2004.

- [3] 王夫亮,尹章顺,陈枫,等. 车轮旋转条件下前轮导流板气动减阻机理研究[J]. 汽车工程, 2016, 38(2): 157-162.
WANG F L, YIN Z S, CHEN F, et al. A Research on the Aerodynamic Drag Reduction Mechanism of Front Wheel Deflectors in a Condition of Wheel Rotation[J]. Automotive Engineering, 2016, 38(2):157-162.
- [4] 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): 87-91.
JIA Q, SHA X, YANG Z G. Influence of Front Wheel Spoiler Height on Complicated Vehicle Aerodynamic Drag[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2017, 45(1): 87-91.
- [5] 李蛟,王玉璋,王夫亮,等. 跨界车前轮导流板减阻的数值模拟研究[J]. 机电一体化, 2021(4): 22-30.
LI J, WANG Y Z, WANG F L, et al. Numerical Simulation Research on Drag Reduction of Front Wheel Deflector of Crossover[J]. Mechatronics, 2021(4): 22-30.
- [6] 陆润明,廖抒华,覃莹莹,等. 基于Kriging模型的某SUV底盘气动性能分析与优化[J]. 机床与液压, 2020, 48(22): 134-139.
LU R M, LIAO S H, QIN Z Y, et al. Analysis and Optimization of Aerodynamic Performance of a SUV Chassis Based on Kriging Model[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2020, 48(22): 134-139.
- [7] 周建川,刘艺池. 基于DOE的前轮扰流板降阻设计控制方法[J]. 汽车画刊, 2024(2): 30-32.
ZHOU J C, LIU Y C. Design and Control Method for Front Wheel Deflector Drag Reduction Based on DOE[J]. AUTO BILD, 2024(2): 30-32.
- [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. 南京: 中国力学学会, 2015: 644-650.
LI G Q, HU X J, LIAO L, et al. DOE Design and Low Drag Coefficient Optimization of External Parameters of Wheel Deflector[C]// Proceedings of the 27th National Conference on Hydrodynamics. Nanjing: The Chinese Society of Theoretical and Applied Mechanics (CSTAM), 2015: 644-650.
- [9] 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.
- [10] 梁建永,梁军,范士杰,等. 轿车外流场CFD分析中常用 $\kappa-\varepsilon$ 湍流模型的对比[J]. 汽车工程, 2008, 30(10): 846-852.
LIANG J Y, LIANG J, FAN S J, et al. Comparison Among $\kappa-\varepsilon$ Turbulence Models in CFD Analysis on Flow Field around a Car[J]. Automotive Engineering, 2008, 30(10): 846-852.
- [11] 王庆洋,肖垚,吴雁飞,等. 某SUV底盘空气动力性能优化研究[J]. 汽车工程学报, 2024, 14(1): 60-71.
WANG Q Y, XIAO Y, WU Y F, et al. Research on Aerodynamic Design Optimization for an SUV Chassis[J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2024, 14(1): 60-71.
- [12] Siemens PLM Software Incorporation. STARCCM+ UserGuide_14.02[M]. USA: Siemens PLM Software Incorporation, 2019: 7134.
- [13] Society of Automotive Engineers. Guidelines for Aerodynamic Assessment of Medium and Heavy Commercial Ground Vehicles Using Computational Fluid Dynamics: SAE Standard J2966[S]. USA: SAE International, 2017.
- [14] 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.
- [15] 郭建成,谷正气,容江磊,等. 基于Kriging模型的某轿车前轮阻风板优化[J]. 郑州大学学报(工学版), 2011, 32(3): 124-128.
GUO J C, GU Z Q, RONG J L, et al. Optimization of Front Wheel Deflector for a Car Based on Kriging Model[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2011, 32(3): 124-128.
- [16] 李文杰,赵健,汪怡平,等. 基于离散伴随法和试验设计的汽车气动减阻优化[J]. 武汉理工大学学报, 2024, 46(5): 132-147.
LI W J, ZHAO J, WANG Y P, et al. Aerodynamic Drag Reduction Optimization of Automobiles Based on Discrete Adjoint Method and Experimental Design[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2024, 46(5): 132-147.

(责任编辑 王 一)

修改稿收到日期为2025年1月16日。