

基于响应面模型的汽车气动特性优化*

查银龙¹ 张扬² 刘学龙² 刘海¹ 王刚¹

(1.河北工业大学,天津 300401;2.中汽研(天津)汽车工程研究院有限公司,天津 300300)

【摘要】为综合改善某车型气动力系数,提出一种外形优化设计方案。首先采用 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型对汽车无侧风工况进行数值模拟,并结合风洞试验验证了仿真模型的可靠性。在此基础上,研究不同侧风角对汽车气动特性的影响,并以横摆角 12° 时的气动力系数为优化参考基准,通过均匀拉丁超立方抽取样本进行流场计算,应用响应面模型近似汽车造型参数与气动力系数的对应关系,基于遗传算法得到 Pareto 前沿解。最终确定了4种优化方案,最大分别使阻力系数降低2.6%、侧力系数降低6.54%、升力系数趋于负值,有效改善了汽车的气动特性。

关键词: 气动特性 风洞试验 响应面模型 遗传算法

中图分类号:U461.1;U462.2 文献标识码:A DOI: 10.19620/j.cnki.1000-3703.20220436

Automotive Aerodynamic Characteristics Optimization Based on Response Surface Model

Zha Yinlong¹, Zhang Yang², Liu Xuelong², Liu Hai¹, Wang Gang¹

(1. Hebei University of Technology, Tianjin 300401; 2. CATARC (Tianjin) Automotive Engineering Research Institute Co., Ltd., Tianjin 300300)

【Abstract】In order to improve vehicle aerodynamic coefficients comprehensively, this paper proposed a shape optimization design scheme. Firstly, vehicle without crosswind was simulated numerically by using realizable $k-\varepsilon$ turbulence model. The reliability of the simulation model was verified by wind tunnel tests. On this basis, the influence of different crosswind angles on the aerodynamic characteristics was studied, the aerodynamic coefficients of yaw angle of 12° were taken as the reference benchmark for optimization, samples were extracted by uniform Latin hypercube for flow field calculation, the response surface model was used to approximate the corresponding relationship between automobile modeling parameters and aerodynamic coefficients, the Pareto front solutions were obtained based on the genetic optimization algorithm. Finally, 4 optimization schemes were determined, which reduced the drag coefficient by 2.6%, the lateral force coefficient by 6.54%, and the lift coefficient tends to be negative, effectively improving the aerodynamic characteristics of the vehicle.

Key words: Aerodynamic characteristic, Wind tunnel test, Response surface model, Genetic algorithm

【引用格式】查银龙, 张扬, 刘学龙, 等. 基于响应面模型的汽车气动特性优化[J]. 汽车技术, 2023(9): 55-62.

ZHA Y L, ZHANG Y, LIU X L, et al. Automotive Aerodynamic Characteristics Optimization Based on Response Surface Model[J]. Automobile Technology, 2023(9): 55-62.

1 前言

汽车气动阻力影响燃油经济性,气动升力影响操纵稳定性^[1],侧风工况下产生的气动侧向力易导致侧滑、横摆甚至侧翻等危险情况发生。汽车高速行驶状态下,受外界风的干扰更为敏感,改善气动特性可提高汽车的综

合性能。一般通过汽车改型来优化气动特性,需要经历建模、网格划分、仿真计算等过程,耗费资源多、周期长,并且很难控制3个气动力系数同时达到最优^[2]。如何提高汽车气动特性优化的效率,平衡所有气动力系数的优化效果成为一大难题。

为此,很多研究人员以单个或多个气动力系数为目

*基金项目:国家自然科学基金项目(12072099,11832011);河北省自然科学基金项目(A2021202023)。

通讯作者:王刚(1989—),男,副教授,博士,研究方向为流体力学、汽车空气动力学等,wanggang@hebut.edu.cn。

标,集成汽车外形优化设计所需的多项技术,来改善气动特性。李壮^[9]以降低气动阻力为目标,借助 Isight 优化软件,优化了某SUV的12个造型参数,获得了很好的减阻效果。张英朝等^[10]结合参数化软件与计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)软件,确定了某载货汽车的8个优化设计变量,使气动阻力系数降低10.4%。张勇等^[9]通过封闭前部底盘,增加附加装置并进行优化,使升力系数降低36.4%。陆润明等^[9]结合多岛遗传算法,通过优化侧围、侧窗及门槛等,降低了气动侧力系数。然而,上述研究主要是对单个气动力系数的优化,未实现汽车气动特性的综合改善,因此,还需进行多个气动力系数的优化研究。刘欢等^[7]基于 modeFRONTIER 优化平台,利用智能算法使 Ahmed 模型的气动阻力及升力系数同时得到优化。亓昌等^[2]考虑了气动阻力系数和侧力系数,对 MIRA 标准模型进行多目标优化,获得最优解集并确定了3种典型优化方案。但以上优化过程未同时考虑3个气动力系数,可能出现一个气动力系数改善,其他气动力系数恶化的情况。

本文综合考虑气动力系数的优化效果,在风洞试验验证仿真模型的基础上,探究不同侧风工况下气动力系数的变化规律,以某侧风工况为基准进行气动特性优化设计。对汽车进行参数化建模,以造型参数作为输入,在参数取值范围内使用均匀拉丁超立方抽取样本点,进行流场计算,输出气动力系数,建立近似输入与输出关系的响应面模型,利用多目标遗传算法进行全局寻优,获得 Pareto 前沿最优解集。

2 模型构建与试验验证

2.1 无侧风工况的仿真模型构建

为使用数值模拟法研究侧风角对汽车气动特性的影响,首先建立汽车无侧风工况的数值仿真模型,借助试验,验证模型的可靠性。汽车车速较低,周围流场压强变化小,故外流场可视为不可压缩流场^[8],其连续性方程和动量守恒方程分别为:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0, i = x, y, z \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} = \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial T_{ij}}{\partial x_j} + S_i, i, j = x, y, z \quad (2)$$

式中, x_i 为 i 方向的位移; u_i 为 i 方向速度分量; t 为时间; ρ 为气体密度; p 为静压力; T_{ij} 为应力张量; S_i 为 i 方向广义源项。

按照 1:1 的比例对某车型进行几何建模,该车型长 4.3 m、宽 1.765 m、高 1.585 m,清理汽车表面,封闭格栅,

保留汽车底盘、机舱等细节,如图 1 所示。

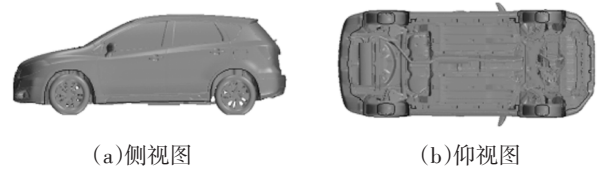


图1 汽车几何表面

建立长 52 m、宽 20 m、高 12 m 的计算域,如图 2 所示。汽车几何的正投影面积为 2.370 3 m²,计算域入口面积约为 240 m²,阻塞比约为 0.988%,小于 5%,满足阻塞比要求^[9]。

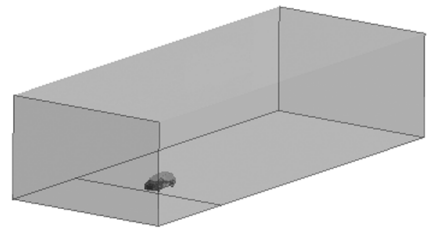


图2 仿真模型的计算域

计算域的边界条件设置如表 1 所示。

表1 边界条件

边界名	边界类型	取值
计算域入口	速度入口	120 km/h
计算域出口	压力出口	0
计算域壁面	壁面	
车前地面	壁面	无滑移
车后地面	壁面	滑移
车身	壁面	
车轮	旋转壁面	976.8 r/min

为提高车身周围的计算精度,设置 2 个加密层,网格截面如图 3 所示。

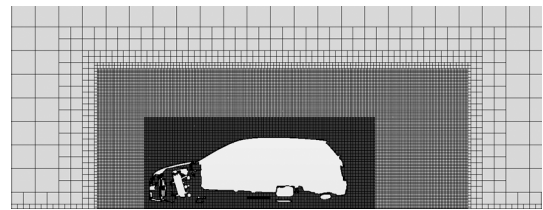


图3 汽车对称面网格截面

利用相关参数计算雷诺数,结果为:

$$Re = \frac{\rho l v_\infty}{\mu} = \frac{1.184 15 \times 33.33 \times 2.6}{1.855 08 \times 10^{-5}} = 553 125 \quad (3)$$

式中, $\rho=1.184 15 \text{ kg/m}^3$; $l=2.6 \text{ m}$ 为轴距; $v_\infty=33.33 \text{ m/s}$ 为相对速度; $\mu=1.855 08 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s/m}^2$ 为动力黏度系数。

雷诺数远大于 4 000,属于湍流问题^[10],采用间接数值模拟雷诺时均法,应用布辛涅司克(Boussinesq)假设使方程封闭。为使仿真计算获得更好的精度,选择带旋

流修正的 Realizable $k-\varepsilon$ 模型^[11],湍流动能 k 及耗散率 ε 方程分别为:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial \rho k u_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + p_b + p_k - \rho \varepsilon + S_k \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial \rho \varepsilon u_i}{\partial x_i} = & \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + \rho C_1 S_\varepsilon - \\ & \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{v \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} P_b + S_\varepsilon \end{aligned} \quad (5)$$

式中, μ_t 为湍流黏度; $C_1 = \max[0.43, \eta/(\eta+5)]$, $\eta = Sk/\varepsilon$ 为系数; $C_2, C_{1\varepsilon}, C_{3\varepsilon}$ 为常量; v 为动力黏度; $S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$ 为表面张力系数; $S_{ij} = (\partial u_i/\partial x_j + \partial u_j/\partial x_i)/2$ 为平均张量旋率; P_b 为浮力产生的湍流动能; P_k 为层流速度梯度产生的湍流动能; $\sigma_\varepsilon, \sigma_k$ 为湍流普朗特数(Prandtl)数; S_ε, S_k 为用户自定义的源项。

通过 STAR-CCM+ 监测仿真模型的气动力,并计算气动阻力系数 C_d ,以便与试验结果对比:

$$C_d = \frac{F_d}{\frac{1}{2} \rho v_\infty^2 A} \quad (6)$$

式中, F_d 为气动阻力; A 为正投影面积。

2.2 仿真结果

图4、图5所示分别为汽车对称位置的速度截面以及表面压力分布情况^[12],可以看出:

a. 由于格栅封闭,气流撞击汽车前部形成低速区,进而产生高压。汽车机舱流入空气极少,速度极低,可以忽略,外部气流会产生分离,分别向汽车上方、底部以及车身两侧流动。

b. 汽车前格栅周围、A柱、后视镜、D柱、后扰流板以及后尾灯等均为负压区。

c. 汽车整体表面压力基本对称,车头与后端存在明显压力差,阻碍汽车行驶,两侧压力相同,无侧向力。



图4 汽车速度截面

在无侧风工况下行驶,汽车主要受气动阻力影响,通过仿真模拟,得到汽车气动阻力系数 $C_d=0.3263$ 。

2.3 风洞试验方案

2.3.1 试验设备

通过风洞试验与上述数值模拟结果进行对比,如图6所示,以试验作为补充,验证模型的可靠性。试验在

中汽研(天津)汽车工程研究院有限公司气动-声学风洞实验室进行,此风洞为回流式、3/4开放式风洞,喷口面积 28 m^2 ,最大风速 250 km/h ,温度控制在 $23\sim 25 \text{ }^\circ\text{C}$,实验室满足测试条件。

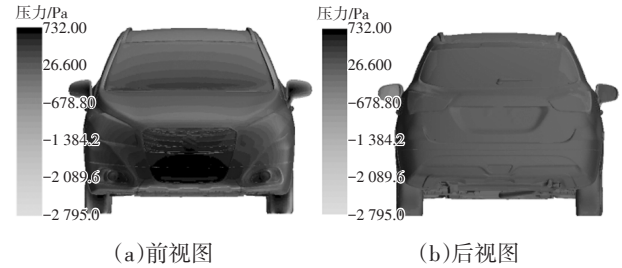


图5 汽车表面压力



图6 汽车风洞试验

2.3.2 仿真模型的试验验证

调节配重改变车身姿态,调整试验车位置,开启试验设备进行检查,确保无异常状态。为观察车速、格栅开闭以及路面模拟对气动阻力系数的影响,进行6种工况的风洞试验。其中,第6种工况与上述仿真条件一致。利用测力天平获得气动力,扫描测量车辆正投影面积,通过式(6)计算气动力阻力系数,试验结果如表2所示。与第6种工况的试验结果对比,数值模拟的误差为5.26%,小于10%,验证了仿真模型的可靠性,证明可通过此仿真模型进行汽车气动特性研究。

表2 试验结果

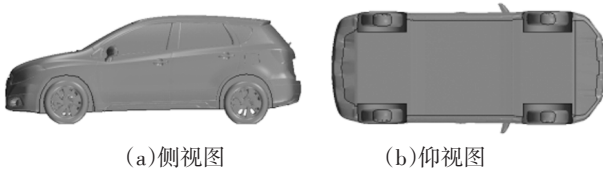
序号	车速 / $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$	格栅状态	路面模拟	气动阻力系数试验结果
1	120	开启	有	0.330
2	120	开启	无	0.332
3	140	开启	有	0.330
4	140	开启	无	0.332
5	120	封闭	有	0.304
6	120	封闭	无	0.310

3 侧风工况下的汽车气动特性

3.1 侧风边界加载

在验证仿真模型可靠性的基础上,通过数值仿真探究不同横摆角对汽车气动特性的影响。由于上述仿真模型格栅封闭,内流场影响极小,可忽略不计,故去除机

舱、平铺底盘,简化原始汽车几何,以节约计算资源,如图7所示。



(a)侧视图 (b)仰视图
图7 简化的汽车几何表面

由于横摆角不为0°,为避免计算域过小干扰流场,将计算域的左侧边界与汽车的距离加长至15倍车宽,并将速度入口设在左侧,右侧设为压力出口,其他条件均保持不变,利用合成速度法进行侧风加载。横摆角从-6°到15°,每隔3°设置一种工况,具体如表3所示。

表3 侧风工况

横摆角/(°)	车速/km·h ⁻¹	侧风速度/km·h ⁻¹	合成速度/km·h ⁻¹
0	120	0	120
±3	120	6.288 9	120.164 7
±6	120	12.612 5	120.661 0
9	120	19.006 1	122.495 8
12	120	25.506 8	122.680 9
15	120	32.153 9	124.233 1

3.2 汽车表面压力分析

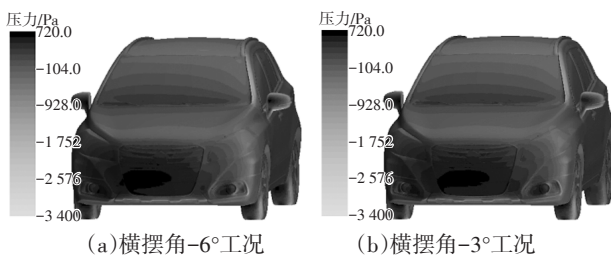
通过仿真模拟,得到不同工况下的汽车迎风侧表面压力如图8所示,可以看出:

a. 横摆角为0°时,正压区主要分布在车辆的正前部,汽车表面压力对称,两侧基本不存在压力差;横摆角±3°与±6°工况下,正压区域偏移方向相反。

b. 在横摆角非0°的工况下,汽车迎风侧的负压区减小,背风侧的负压区增大,两侧压差增大,正压区域较大且出现偏移,横摆角越大,正压区偏移越明显,气动侧向力越大。

c. 横摆角越大,压力峰值越大,汽车前端正压区域越大,气动阻力增加;随横摆角的增大,车顶表面压力也逐渐趋于负压力,汽车升力有增大的趋势。

可见在侧风工况下,流场失去对称性,随横摆角的增大,汽车的气动侧力增幅尤为明显,影响驾驶安全性。综合考虑气动力系数,对汽车外形进行优化,可改善汽车气动特性。



(a)横摆角-6°工况 (b)横摆角-3°工况

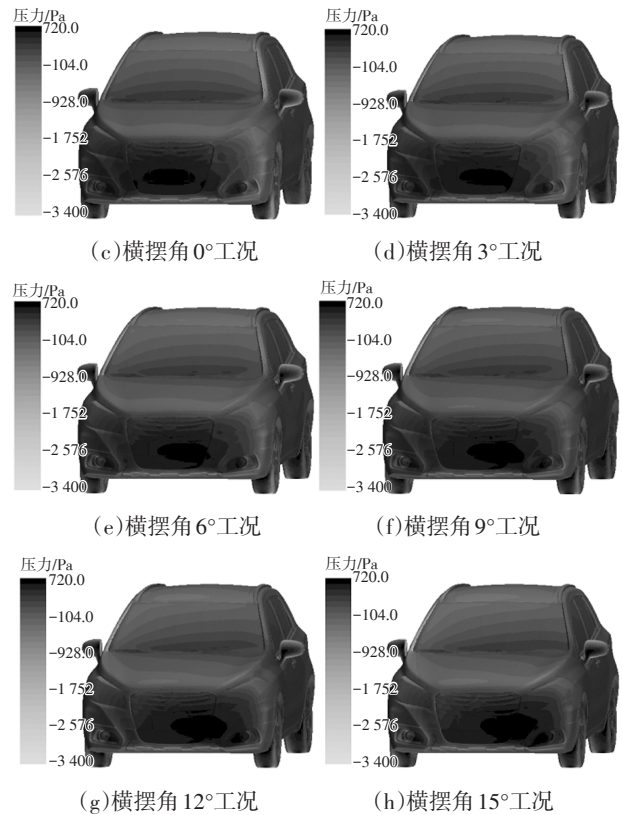
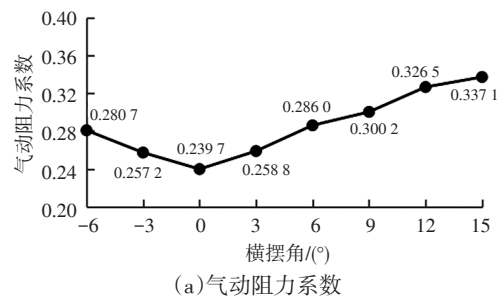


图8 侧风工况汽车压力表面

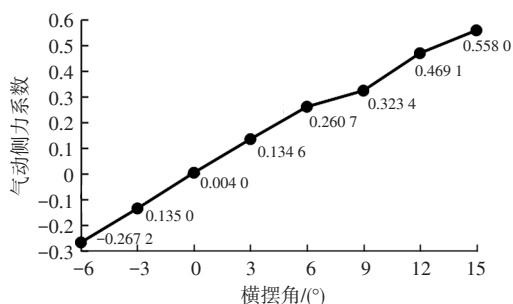
3.3 汽车气动力系数分析

不同工况下的气动力系数结果及变化趋势如图9所示,可以看出:横摆角为0°时,存在气动阻力,而侧力系数接近于0,随着横摆角的增大,除升力系数稍有波动外,气动力系数基本呈上升趋势;横摆角3°与-3°的工况(±6°工况类似),气动阻力系数、升力系数基本一致,气动侧力系数的数值大小接近,方向相反;横摆角从0°到15°的工况,气动侧力系数较阻力系数及升力系数的增幅均更大。

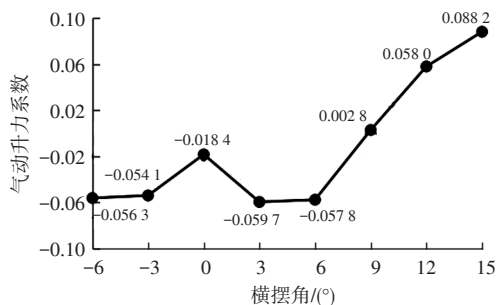
因汽车两侧并非绝对对称,横摆角相反的工况下,气动力系数存在较小差别。横摆角增大,会导致汽车的气动力系数恶化,其中对气动侧力系数的影响最大。气动阻力系数增加,影响燃油经济性;升力系数的增加会降低汽车轮胎的附着力;气动侧力的增大影响汽车的行驶稳定性。故选择存在横摆角的工况,对气动力系数进行优化,降低气动力对汽车行驶的影响。



(a)气动阻力系数



(b)气动侧力系数



(c)气动升力系数

图9 不同工况下的气动力系数

4 多目标优化设计

4.1 汽车气动特性优化

研究发现,横摆角增大,会导致气动力系数增大,进而降低汽车的综合性能,故基于某侧风工况进行汽车气动特性优化。以横摆角 12° 工况为例,综合考虑气动阻力系数、侧力系数、升力系数,平衡气动力系数的优化效果,对后扰流板、D柱以及后尾灯等部位进行优化,改善汽车的气动特性。

为实现高效的汽车外形优化,借助软件 mode-FRONTIER 优化平台,以所选造型参数作为输入变量,通过改变输入值控制汽车几何表面变形,使用均匀拉丁超立方抽取样本点,进行仿真计算可获得输出目标。响应面模型近似输入与输出的关系,可用有限数量的样本点较准确地预测响应变量,提高优化效率。在保证响应面模型精度的基础上,选择遗传算法全局寻优,生成 Pareto 前沿解集。具体操作过程如图 10 所示。

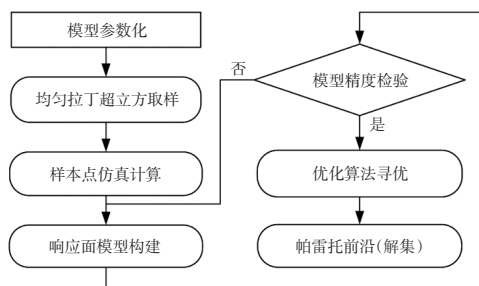


图10 优化操作流程

4.2 参数化与试验设计

为方便汽车改型,首先对车辆进行参数化建模,选取后扰流板 z 方向和 x 方向的长度变量 X_1 、 X_2 ,D柱的延伸量 X_3 ,以及后尾灯突出部分的长度变量 X_4 为设计变量。定义模型原始位置参数为0,借助控制点,改变参数的大小即可改变汽车几何的外形。设计变量的取值范围如表4所示,位置及方向如图11所示。

表4 设计变量取值范围

设计变量	X_1	X_2	X_3	X_4
取值范围	-10~15	-15~15	-30~10	-30~1

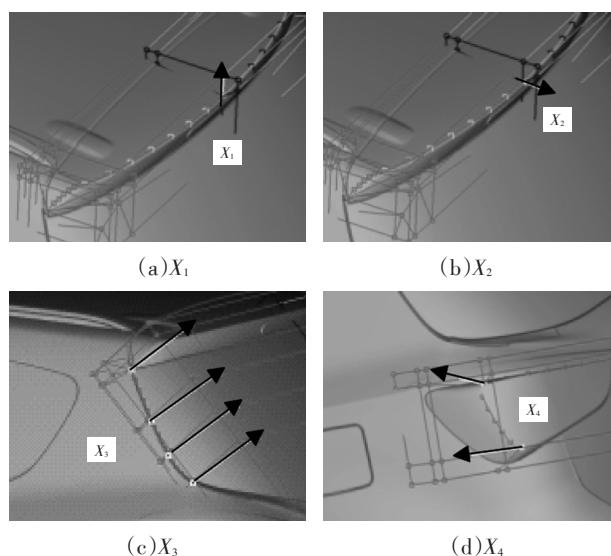


图11 设计变量的位置及方向

使用均匀拉丁超立方方法^[13],抽取30组试验设计样本点。通过Java脚本文件,调用STAR-CCM+对所选样本点进行流场计算,以计算得到的气动力系数作为输出。以横摆角 12° 的气动力参数为约束上限,使气动阻力系数、侧力系数最小化,升力系数也得到一定程度的减小。

4.3 参数分析与响应面模型

基于样本点的计算结果,生成如图12所示的输入变量与输出变量的相关系数矩阵。通过该矩阵进行参数敏感性分析,可判断各输入变量对输出量的影响程度,为构建响应面模型提供参考。

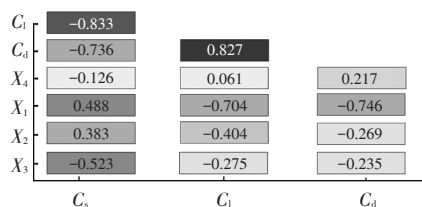


图12 参数敏感性分析

由图12可以看出:后尾灯与侧力系数 C_i 呈负相关、与阻力系数 C_f 及升力系数 C_a 呈正相关;D柱、后扰流板与阻力系数及升力系数呈负相关,与侧力系数呈正相

关;侧力系数与阻力系数、升力系数呈负相关,升力系数与阻力系数呈正相关。

通过回归系数 R^2 进行精度检验,最终选择精度较好的各向异性克里金(Anisotropic Kriging)法对气动阻力系数进行响应面模型构建,回归曲线如图13所示,回归系数 $R^2=0.944$ 。使用径向基函数(Radial Basis Function, RBF)对气动侧力系数、升力系数进行响应面模型构建,回归曲线如图14、图15所示,回归系数 R^2 分别为0.906、0.996,均在0.9以上,精度满足要求。

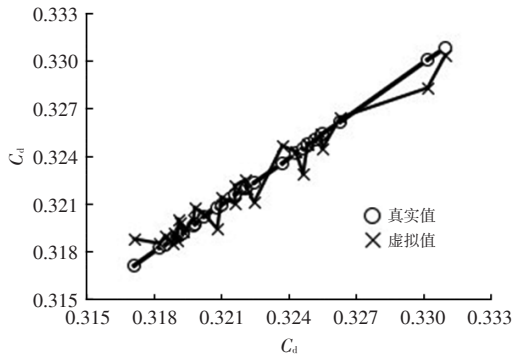


图13 阻力系数各向异性克里金回归曲线

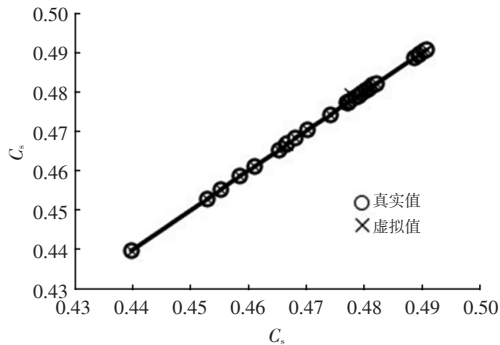


图14 侧力系数RBF回归曲线

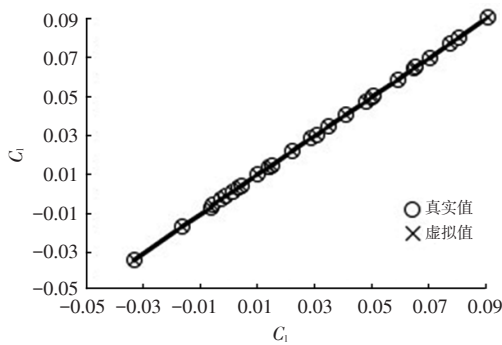
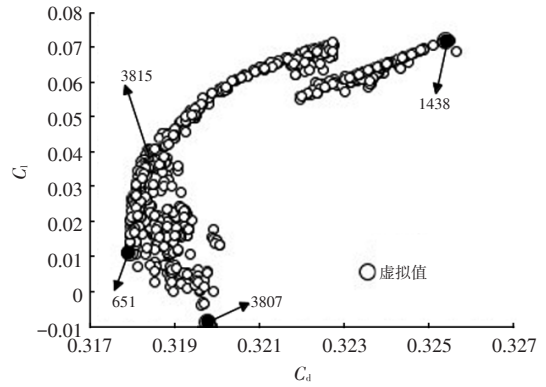


图15 升力系数RBF回归曲线

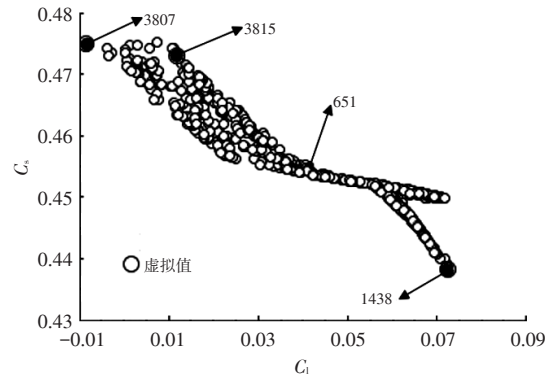
4.4 优化结果分析

基于建立的响应面模型,选用非支配排序的多目标遗传算法^[14]进行全局寻优,以样本点的计算结果作为初始种群,迭代4 000次后,得到如图16所示的Pareto前沿解集。图16a中阻力系数 C_d 与升力系数 C_l 结点分布大

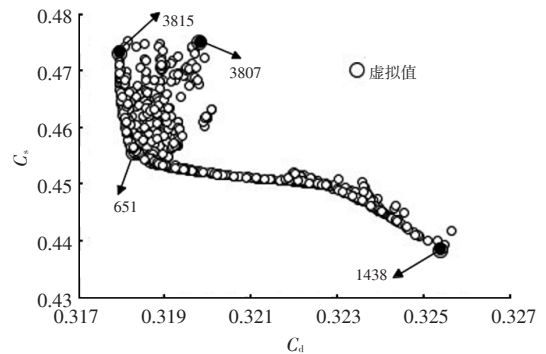
体呈正相关;由图16b、图16c可以看出,侧力系数 C_s 与气动阻力系数、升力系数矛盾, C_s 得到改善,会导致 C_d 、 C_l 变差,优化目标不协同,与参数分析结果一致。



(a)阻力系数与升力系数



(b)升力系数与侧力系数



(c)侧力系数与阻力系数

图16 Pareto前沿解集

参考基准横摆角 12° 工况下的气动力系数 $C_d=0.326 5$, $C_s=0.469 1$, $C_l=0.058 0$ 。在最优解集中,结点气动力系数比参考基准小,则可认定为有效优化。在图16中选取最优解进行标号,确定了4种较好的优化方案。

优化方案1:标号3185, $C_d=0.317 9$, $C_s=0.473 0$, $C_l=0.011 5$ 。该方案升力系数大幅改善,侧力系数与基准相比稍差,气动阻力系数降低最多约2.63%,可改善汽车的燃油经济性^[1]。

优化方案2:标号3807, $C_d=0.319 7$, $C_s=0.475 0$,

$C_i=-0.0085$ 。气动阻力系数降低约2.1%,气动侧力系数最差,升力系数减小为负值,但接近于0,升力系数的适当降低,提高了操纵稳定性^[5]。

优化方案3:标号1438, $C_d=0.3253$, $C_s=0.4384$, $C_l=0.0720$ 。气动阻力基本与基准一致,气动升力系数最差,侧力系数降低最多达6.54%,改善了气动稳定性^[4]。

优化方案4:标号651, $C_d=0.3182$, $C_s=0.4556$, $C_l=0.0371$ 。各项气动力系数均低于基准, C_d 降低2.54%, C_s 降低2.87%, C_l 也有所降低,但均未达到最大程度的减小,此方案属于折衷解。

以上优化方案所对应的设计变量取值如表5所示,可根据实际工程要求以及设计规范,以Pareto前沿解集为参考,选取汽车外形的设计方案。

表5 优化方案设计变量 mm

优化方案	X_1	X_2	X_3	X_4
1	10.7492	-6.0846	-3.1685	-20.2520
2	14.9828	-4.0646	-4.4293	-9.3755
3	-3.3418	15.0000	-26.983	-29.8230
4	10.3527	14.9420	-11.479	-17.5270

5 结束语

本文以某车型为研究对象,在验证仿真模型精度及可靠性的基础上,利用简化模型探究了不同横摆角下气动力系数的变化规律,以3个气动力系数为目标进行汽车外形优化,改善汽车的气动特性,研究结果如下:

a. 应用Realizable $k-\epsilon$ 模型进行数值仿真模拟,与试验结果的误差为5.26%,验证了仿真模型的精度及可靠性。

b. 不同侧风工况下,横摆角越大,汽车表面正压区越大,压力偏移越明显,两侧的压力差增大,汽车气动阻力系数、侧力系数、升力系数增大,气动特性变差。

c. 气动阻力系数与升力系数的优化基本协同,呈正相关;气动阻力系数、升力系数与侧力系数的优化不协同,侧力系数的改善可能引起其他2个目标的恶化。

d. 综合考虑汽车气动阻力系数、侧力系数、升力系数进行的多目标优化,最终确定了4种优化方案。

参 考 文 献

- [1] 谷正气. 汽车空气动力学[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
GU Z Q. Vehicle Aerodynamics[M]. Beijing: People's Communications Press, 2005.
- [2] 亓昌, 韩元吉, 杨姝, 等. 考虑气动阻力和横风稳定的汽车车身多目标优化设计[J]. 汽车安全与节能学报, 2020, 11(1): 53-60.

LI Z. Research on Global Optimization Design of Pneumatic Drag Reduction for SUV Models[D]. Changchun: Jilin University, 2021.

- [3] 李壮. SUV车型气动减阻全局优化设计研究[D]. 长春: 吉林大学, 2021.
- [4] 张英朝, 李昀航, 郭子瑜, 等. 长头重型卡车气动减阻优化[J]. 吉林大学学报(工学版), 52(4): 745-753.
ZHANG Y C, LI Y H, GUO Z Y, et al. Aerodynamic Drag Reduction Optimization of Long-Head Heavy Truck[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 52(4): 745-753.
- [5] 张勇, 林旗波, 肖业, 等. 基于近似模型的气动升力优化研究[J]. 湖南工业大学学报, 2021, 35(4): 1-8+97.
ZHANG Y, LIN Q B, XIAO Y, et al. Research on Aerodynamic Lift Optimization Based on Approximate Model[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2021, 35(4): 1-8+97.
- [6] 陆润明, 廖抒华, 覃紫莹. 某轿车侧风作用下的气动特性分析与改进研究[J]. 计算机仿真, 2021, 38(3): 56-62.
LU R M, LIAO S H, QIN Z Y. Aerodynamic Characteristics Analysis and Improvement of a Car under Crosswind[J]. Computer Simulation, 2021, 38(3): 56-62.
- [7] 刘欢, 韩思远, 李飞. 基于modeFRONTIER软件的空气动力学多目标智能优化[J]. 汽车工程师, 2018(5): 42-45.
LIU H, HAN S Y, LI F. Aerodynamic Multi-Objective Intelligent Optimization Based on modeFRONTIER Software[J]. Automotive Engineer, 2018(5): 42-45.
- [8] 傅立敏. 汽车设计与空气动力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
FU L M. Automobile Design and Aerodynamics[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2010.
- [9] 支询, 李施, 刘源, 等. 风洞阻塞比系数试验与研究[J]. 测绘技术, 2017, 37(增刊1): 356-358.
ZHI X, LI S, LIU Y, et al. Wind Tunnel Blocking Ratio Test and Research[J]. Measurement and Measurement Technology, 2017, 37(S1): 356-358.
- [10] 张兆顺, 崔桂香. 流体力学[M]. 第3版. 北京: 清华大学出版社, 2015.
ZHANG Z S, CUI G X. Fluid Mechanics[M]. 3rd Edition. Beijing: Tsinghua University Press, 2015.
- [11] 宋亚豪, 谷正气, 刘水长, 等. 汽车外流场数值仿真 $k-\epsilon$ 模型适用性研究[J]. 湖南工业大学学报, 2019, 33(1): 66-72.
SONG Y H, GU Z Q, LIU S C, et al. Research on

- Applicability of $k-\varepsilon$ Model for Numerical Simulation of Automobile Outflow Field[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2019, 33 (1): 66-72.
- [12] 魏志成. 基于Star-ccm+的SUV气动特性研究以及减阻优化[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2019.
WEI Z C. Study on Aerodynamic Characteristics and Drag Reduction Optimization of SUV Based on Star-ccm+[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2019.
- [13] MCKAY M D, BECKMAN R J, CONOVER W J. A Comparison of Three Methods for Selecting Values of Input Variables in the Analysis of Output from a Computer Code [J]. Technometrics, 2012, 42(1): 55-61.
- [14] DEB K, AGRAWAL S, PRATAP A, et al. A Fast Elitist Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm for Multi-Objective Optimization: NSGA-II[M]// SCHOENAUER M, DEB K, RUDOLPH G, et al. Parallel Problem Solving from Nature-PPSN VI. Heidelberg: Springer, 2000: 849 - 858.
(责任编辑 斛 畔)
- 修改稿收到日期为2022年6月26日。

《汽车工艺与材料》投稿须知

《汽车工艺与材料》杂志创刊于1986年,是由中国第一汽车集团有限公司主办的国内外公开发行的汽车制造类月刊、中国汽车工程学会会刊,是全面报道汽车先进制造工艺与材料应用的专业性杂志。

《汽车工艺与材料》杂志始终致力于汽车制造新技术的开发(如汽车制造领域中的四大工艺)、新材料的研究应用、轻量化技术、智能制造、绿色制造技术、加工技术、生产装备、检测技术、数字化模拟技术及生产管理等方面的报道。努力为汽车及零部件生产中各门类的决策者及研究开发人员提供更好、更快、更节约成本的汽车行业发展动态信息,为其适应国内与国际激烈的汽车生产市场竞争提供有效的帮助。

《汽车工艺与材料》杂志关注领先的整车及零部件企业和材料、装备等供应商,及时报道汽车行业最新的设计、制造、材料、加工技术、生产装备、检测技术等方面的成功案例。

主要栏目:

AT&M视界、生产现场、材料应用、生产装备、检测技术、数字化园地、行业动态等。

投稿要求:

- (1) 来稿须具有独创性并与实践相结合,文章字数最好控制在6000字以内。
- (2) 来稿不能在国内、外公开杂志上发表过,严禁一稿多投,对同时一稿多投者,编辑部将视对本刊声誉、工作上造成的影响程度,采取相应处理措施。
- (3) 来稿的试验方法、试验数据、试验结论必须准确、可靠。
- (4) 来稿须包括以下项目:题名、作者姓名、作者单位、中文摘要(200字左右)、参考文献等。来稿采用word文档的格式。
- (5) 来稿文章格式应符合一般科技论文格式,或参考近期本刊所刊登文章格式。
- (6) 稿件图片请发清晰原图,图形尺寸应适中,并配上图名和图号,且文中要有相应体现(例如:如图1所示、见图2等)。图中英文需要翻译成中文。
- (7) 计量单位必须采用(或换算成)中华人民共和国法定计量单位。文章中文字字母大小写、上下角标应书写正确,避免同一符号代表2种及以上物理量的情况出现。
- (8) 文章必须附有公开发表的参考文献,且在文中应标注文献引用处。参考文献注录项目应齐全,包括作者姓名、题名、刊名(或书名,图书应注明出版地与出版社)、出版年、卷、期。
- (9) 请在来稿时注明作者联系方式(包含手机、办公室电话、E-mail等)。
- (10) 本刊投稿网址:<http://qcgycj.cbpt.cnki.net>,咨询电话:0431-82028069。

竭诚欢迎汽车行业及相关各界的专家学者积极向本刊投稿。