

文章编号:1671-6833(2011)03-0124-05

基于 Kriging 模型的某轿车前轮阻风板优化

郭建成¹, 谷正气^{1,2}, 容江磊¹, 张清林¹

(1. 湖南大学 汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 湖南 长沙 410082; 2. 湖南工业大学校党委, 湖南 株洲 412008)

摘要:将数值优化方法和 CFD 仿真结合, 对某轿车前轮阻风板进行了优化。以前轮阻风板的高度和安装位置为变量, 通过 DOE 拉丁试验方法选取了 20 组样本点。利用 CFD 仿真得到各样本点的响应值, 由响应值建立 Kriging 近似模型。在验证了近似模型的可信度基础上, 通过多岛遗传算法对近似模型进行全局寻优。优化结果表明:在不增大升力的前提下, 前轮阻风板最多可将气动阻力由 827.4 N 降到 792.4 N, 降幅为 4.23%。若阻力、升力的权重分别设为 0.85 和 0.15, 气动阻力降为 796.8 N, 降幅为 3.70%; 气动升力降为 382.6 N, 降幅为 6.55%。

关键词:前轮阻风板; CFD 仿真; 试验设计; Kriging 模型; 多岛遗传算法

中图分类号: U461.01

文献标志码: A

0 引言

高速行驶时的气动阻力对燃油消耗有很大影响, 通过减小汽车行驶时的气动阻力来降低油耗, 已成为提高燃油经济性的一种重要手段^[1]。研究表明, 底盘、车轮和轮腔占汽车总气动阻力的比例较大^[2], 汽车底部外形越复杂, 气动阻力系数和气动升力系数越大; 对气动阻力系数影响最大的是车轮, 对气动升力影响最大的是轮腔^[3]。底盘的结构复杂, 会对气流流动形成较大的阻碍作用; 而车轮的旋转和轮腔的复杂形状也会加剧轮腔内气流的紊乱。改善汽车底部气流常用的方法是加装气动附件, 笔者通过加装前轮阻风板来优化底部和轮腔气流以及气动阻力和升力。

研究气动附件的优化效果的主要方法有风洞试验和 CFD 仿真。但由于底盘和轮腔形状非常复杂, 因此风洞试验的模型一般都对其实做平整化处理, 很难模拟出底部和轮腔的实际气流状况。所以更有效的方法是采用数值模拟的方法进行 CFD 仿真, 在汽车的 CAD 模型上添加阻风板模型然后仿真计算。然而模型的修改往往是凭经验来进行,

改型完成后再通过 CFD 计算验证是否有改善效果, 若流场没有改善则继续改型, 带有较大的盲目性和随机性, 经常出现耗费大量时间却得不到优化效果的情况, 即使有所改善, 也很难确定得到的方案是否是最优方案。

针对传统方法耗时和不确定性的问题, 笔者以某轿车为例, 介绍了一种将参数化优化方法与 CFD 相结合的优化方法, 对某轿车的前轮阻风板进行了优化。首先, 以前轮阻风板的高度和 x 向安装位置为变量, 通过 DOE 拉丁试验方法选取了 20 组样本点。然后, 利用 CFD 仿真得到各样本点的响应值, 由响应值建立 Kriging 近似代理模型。最后, 在验证了近似模型的可信度之后, 通过遗传算法对模型进行全局寻优。

1 CAD 模型及原车 CFD 分析

1.1 CAD 模型建立

笔者以某轿车作为研究对象, 其 CAD 模型是在 UG4.0 里建立的。由于实车模型非常复杂, 会给网格绘制和计算带来很大困难, 而且耗时长、效率低, 因此需要对车身模型进行简化, 忽略对气动

收稿日期: 2010-12-17; 修订日期: 2011-02-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(50975083); 教育部长江学者与创新团队发展计划项目(531105050037); 湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室自主课题项目(61075001)。湖南省科技攻关计划重点项目(2009JT1014)

作者简介: 郭建成(1987-), 男, 山东日照人, 湖南大学硕士生, 主要研究方向为汽车空气动力学, E-mail: guojiancheng87@yahoo.cn; 通信作者: 谷正气(1963-)男, 湖南长沙人, 湖南工业大学教授, 博士, 博士生导师。研究方向为汽车空气动力学、汽车电子技术。E-mail: guzhengqi@yahoo.cn。

力计算影响很小的一些细节,如门把手,雨刮器等,同时为研究阻风板对底部气流的影响,保留了底盘和轮腔的细节.简化后安装有前轮阻风板的模型如图1所示.

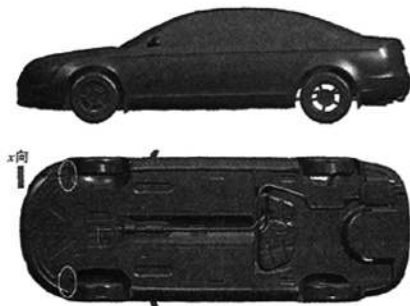


图1 模型及阻风板 CAD 视图

Fig.1 CAD model of the car and the air dam skirts

1.2 网格划分

为准确模拟实际风洞的气流状况,建立一外轮廓为长方体计算域.根据汽车外流场的特点,结合以往计算经验,设置计算域的大小为:入口距模型前端3倍车长,出口距模型后端6倍车长,总高度为4倍车高,总宽度为7倍车宽.采用 Delaunay 三角形方法在整个计算流域面生成半尺寸化网格,在车身表面拉伸出与其平行的三棱柱网格作为附面层,以消除壁面函数的影响.为提高计算精度,建立包围车身的密度核,同时为了避免网格差异对仿真结果的影响,在每次仿真过程中,保持模型的相同部分网格尺寸不变^[4].每次模拟生成的整车总网格数约为410万左右.

1.3 边界条件及湍流模型

采用流体计算软件 Fluent 进行 CFD 计算,对各参数作如下设置:设置计算域入口为速度入口边界,速度沿 x 方向,大小为 40 m/s ;计算域出口为压力出口边界;设置车身表面为无滑移壁面边界条件;计算域上表面及左右侧面均设置为滑移壁面边界条件;为消除地面效应的影响,设置地板为速度沿 x 方向大小为 40 m/s 的移动壁面.

汽车车速一般远低于声速,汽车空气动力学属于低速空气动力学^[1],因而汽车周围流场可以看作是三维不可压缩黏性等温流场.由于其外形复杂容易引起分离,所以应按湍流处理.仿真中常用的湍流模型有 Spalart-Allmaras 模型、Reynolds Stress 模型、标准 $k-\varepsilon$ 模型、RNG $k-\varepsilon$ 模型、 $R k-\varepsilon$ 模型.研究表明,RNG $k-\varepsilon$ 模型考虑中涡流因素影响和低雷诺数效应,可有效模拟汽车尾部和底部复杂旋涡流动结构,计算湍流精度较高,且

计算量小,是5种模型中较适于汽车外部复杂流场数值仿真计算的湍流模型^[5].因此笔者的仿真选用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型.

为验证参数设置和湍流模型选择的合理性,通过简化模型风洞试验和仿真结果对比.将原车模型在车头、车尾、后视镜、车窗等处进行简化,并忽略门把手等细节,对底盘进行了平整化处理,根据简化模型按1:3的比例加工成实验模型,进行风洞试验.试验在湖南大学风工程试验研究中心进行,风速为 40 m/s .启动地面覆面层抽吸装置,消除了由于风洞实验引起的地面边界层.模型气动阻力由六分力浮框式测力天平测得.模型如图2所示.

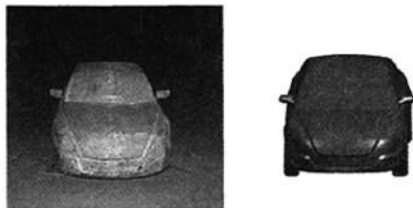


图2 风洞试验模型和简化模型

Fig.2 Wind tunnel test model and simplified model

风洞试验测得 C_d 为 0.280,仿真结果为 0.286,仿真结果和实验误差在 3% 以内,证明参数设置和湍流模型选取是合理的.采用同样的设置,保留 CAD 模型的底盘和轮腔细节,绘制网格后对模型进行 CFD 仿真计算,得到原车气动阻力为 827.4 N ,气动升力 409.4 N .

2 实验设计及计算

2.1 设计变量及约束

阻风板的 x 向投影形状为长方形,上端通过安装孔安装在底板上,根据轮腔和车轮宽度确定阻风板横向长度为 243 mm .选取阻风板高度和阻风板 x 方向安装位置为设计变量,考虑离地间隙、道路通过能力和轮腔形状等因素,设定阻风板高度在区间 $[0, 75]$ 内, x 方向安装位置参考轮腔前缘确定坐标在区间 $[-735.7, -680.7]$ 内,单位均为毫米.

2.2 目标函数

安装前轮阻风板的目的在于减小高速行驶的气动阻力,同时考虑汽车高速行驶时可能发生的“发飘”现象,可以适当降低升力.选取气动阻力和升力作为优化对象,且以减阻为主,所以在优化时配备不同的权重,优化问题可描述如下:

$$\text{Min} F = \omega_1 F_D + \omega_2 F_z \quad (1)$$

$s. t. F_L \leq 409.4 \text{ N} \quad (2)$

式中: F_D 、 F_L 分别为整车的气动阻力和气动升力, ω_1 、 ω_2 为权重系数. 为研究在不增大升力前提下阻风板的最大减阻能力,同时考虑阻力、升力两种情况,权重系数 ω_1 、 ω_2 取两组方案,方案一取 1, 0, 方案二取 0.85, 0.15.

2.3 实验设计及仿真计算

试验设计是在整个设计空间中选取有限数量的样本,能够尽可能全面反映设计空间特性,样本点的选取直接决定了近似模型的构建精度,因此选择合适的试验方法尤为重要. 在各种试验设计技术中,拉丁方法是一种高效的试验设计技术,能够用较少的样本点获得大量的模型信息^[6],每个因子可取多个水平,在设计空间内均匀采样. 笔者选用拉丁方法在抽样区间里选择 20 组变量.

根据选择的 20 组变量建立 20 组安装在不同位置并具有不同高度的阻风板模型,再对整车模型绘制网格,然后通过 CFD 计算得到所有样本点的气动阻力和升力,即用于构建近似模型的响应值.

3 近似模型的建立

3.1 建立近似模型及验证

代理模型就是在不降低精度的情况下,构造一个计算量小,但计算结果与计算机仿真分析结果相近的数学模型来“代理”相应的仿真分析^[7],

然后在代理模型上实现优化. 常用的代理模型有响应表面模型、Kriging 模型、径向基函数模型等^[8]. Kriging 方法最早由南非地质学者 Danie Krige 于 1951 年提出,至 80 年代末, Sacks 等人研究了基于 Kriging 模型的计算机试验分析和设计技术,将 Kriging 模型应用于确定性的计算数据的插值近似^[9]. 与其它近似模拟技术相比, Kriging 模型更具统计性,它的有效性不依赖于随机误差的存在,具有良好的全局统计特性^[10],因此选择 Kriging 模型作为全局代理模型来代替大量的仿真.

Kriging 模型假设系统的响应值与自变量之间的真实关系可以表示成如下的形式:

$y(x) = g(x) + z(x) \quad (3)$

式中: $g(x)$ 是一个确定性部分,称为确定性漂移; $z(x)$ 称为涨落,为均值为 0 方差为 σ^2 协方差非零的随机过程; $y(x)$ 是未知的近似模型. $g(x)$ 起设计空间中的全局近似作用, $z(x)$ 在全局模型的基础上创建了局部偏差^[11].

将 20 组样本点的输入值和响应值导入来构建 Kriging 近似模型,然后选择 2 组不同的样本点用于验证近似模型的精度. 验证结果如表 1 所示. 从表 1 中的阻力、升力值以及误差中可以看出,建立的近似模型具有较高的精度,可以用于进一步寻优.

表 1 近似代理模型验证

Tab.1 Verification of the approximate model

设计变量/mm		气动阻力			气动升力		
x	z	仿真值/N	近似模型值/N	误差/%	仿真值/N	近似模型值/N	误差/%
14	28	815.0	822.4	0.91	387.6	397.8	2.63
26	37	805.9	817.2	1.40	379.7	387.7	2.11
35	10	818.6	821.3	0.33	352.8	349.9	-0.82

3.2 算法选择及全局寻优

目前常用的优化算法主要有传统遗传算法、多岛遗传算法、粒子群算法、蚁群算法、模拟退火算法等. 多岛遗传算法区别于传统遗传算法的特点是每一代的所有个体被分成几个称为“岛”的子集,每种遗传操作如选择、交叉、变异等都在每个岛上独立进行,然后通过迁移操作进行结果的共享^[11]. 迁移过程由两个参数进行控制,分别为迁移间隔和迁移率,迁移间隔表示每次迁移的代数,迁移率决定了在一次迁移过程中每个岛上迁移的个体数量的百分比. 多岛遗传算法中的迁移操作保持了优化解的多样性,提高了包含全局最优解的机会^[12],能保存前代最好的个体,使得最

好的基因能传到下一代^[13],所以采用多岛遗传算法作为寻优的算法.

3.3 优化过程分析

整个优化过程,首先要确定目标函数和变量,再选样本点并通过得到的输入和输出值建立近似模型;然后验证近似模型:若模型准确则用算法寻优,若不精确则需重新选样本点;最后通过仿真验证寻优结果:若仿真结果和近似模型结果吻合则输出优化结果,若不吻合则将此次得到的最优数据返回添加到样本点的输入输出值当中,重新建立近似模型并验证后继续寻优. 其优化流程简图如图 3 所示.

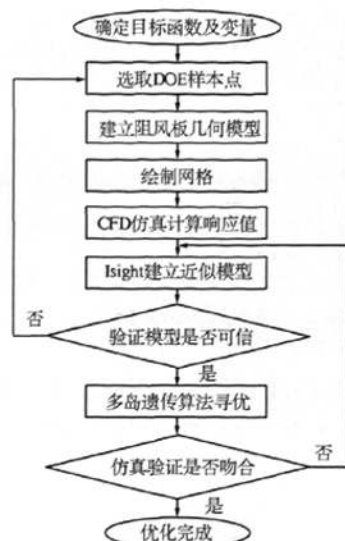


图3 优化过程示意图

Fig.3 Sketch of the optimization process

3.4 优化结果分析

通过多岛遗传算法对建立的近似模型进行全局寻优,得到满足目标函数的最优组合方案一为 $x = -711.7, Z = 64$, 方案二为 $x = -714.7, z = 53$. 方案一最优值仿真计算得到的气动阻力为 792.4 N, 升力为 411.2 N; 而近似模型值分别为 799.3 N、409.4 N, 阻力误差为 0.87%, 升力误差为 -0.44%. 方案一优化前后效果如表2所示.

表2 方案一优化前后对比

Tab.2 Contrast of the aerodynamic drag and lift

原车气动阻力/N	优化后气动阻力/N	优化效果
827.4	792.4	-4.23%

优化后底部的气流状况和尾涡都有所改善, 优化前后气流状况对比如图4所示. 从图中可以看到, 流场得到了优化.

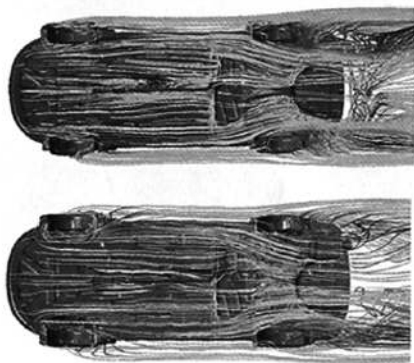


图4 方案一优化前后底部气流对比

Fig.4 Contrast of the streamlines of the underbody

万方数据

方案二最优值仿真计算后的气动阻力和升力分别为 796.8 N、382.6 N, 而对应的近似模型值为 801.7 N、376.4 N, 误差分别为 1.17%, -1.52%. 优化效果如表3所示.

表3 方案二优化前后对比

Tab.3 Contrast of the aerodynamic drag and lift

气动阻力			气动升力		
最优值/ N	原车/ N	优化 效果	最优值/ N	原车/ N	优化 效果
796.8	827.4	-3.70%	382.6	409.4	-6.55%

优化前后压力对比如图5所示, 从图5可以看出, 阻风板优化后, 车轮迎面正压区减小, 从而引起汽车气动阻力的降低, 而底盘的负压增大引起了升力的下降.

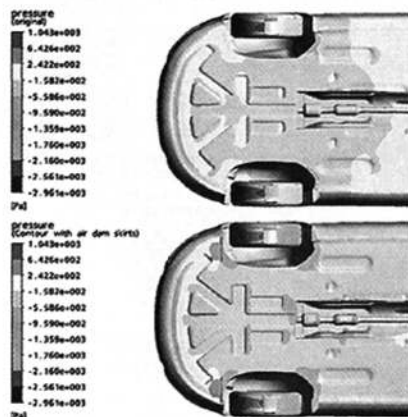


图5 方案二优化前后压力分布对比

Fig.5 Contrast of pressure distribution of the underbody

4 结论

笔者将近似代理模型和优化算法结合, 对某轿车的前轮阻风板进行了优化, 得出了以下结论:

(1) 汽车的前轮阻风板在合适的安装位置和高度时, 能起到同时减小高速行驶时的气动阻力和升力的目的.

(2) 将近似模型和优化算法结合, 可以根据不同目的确定不同目标函数, 对汽车气动附件进行优化, 来实现优化汽车气动性能的目的.

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: 80-115.
- [2] SIMONE S. Numerical simulations of a car underbody: effect of front-wheel deflectors [J]. SAE Paper, 2004, 52(1): 1307-1311.

- [3] 王靖宇, 赖晨光, 胡兴军. 汽车底部外形对气动特性的影响[J]. 中国公路学报, 2008, 21(2): 111 - 115.
- [4] 杨胜, 张扬军, 涂尚荣, 等. 汽车外部复杂流场计算的湍流模型比较[J]. 汽车工程, 2003, 2(4): 321 - 325.
- [5] 邓薇, 崔新涛, 王树新. 基于 Kriging 模型的汽车车门抗撞性优化设计[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2007, 8(1): 29 - 31.
- [6] 张维刚, 刘晖. Kriging 模型与优化算法在汽车乘员约束系统仿真优化中的应用研究[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2008, 35(6): 23 - 26.
- [7] 穆雪峰, 姚卫星, 余雄庆, 等. 多学科设计优化中常用代理模型的研究[J]. 计算力学学报, 2005, 22(5): 608 - 612.
- [8] 苏伟, 高正红, 夏露. 一种代理遗传算法及其在气动优化设计中的应用[J]. 西北工业大学学报自然科学版, 2008, 26(3): 303 - 307.
- [9] MARTIN J D. SIMPSON T W. Use of Kriging models to approximate deterministic computer models[J]. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2005, 43(04): 853 - 863.
- [10] 李焦赞, 高正红. 气动设计问题中确定性优化与稳健优化的对比研究[J]. 航空计算技术, 2010, 40(2): 28 - 30.
- [11] 石秀华, 孟祥众, 杜向党, 等. 基于多岛遗传算法的振动控制传感器优化配置[J]. 振动、测试与诊断, 2008, 28(1): 62 - 65.
- [12] 陈剑, 徐陈夏. 发动机悬置系统优化设计及其可靠性分析[J]. 汽车工程, 2009, 31(3): 234 - 237.
- [13] 张万涛, 余宏明. 正交试验设计方法在库岸滑坡敏感性分析中的应用[J]. 安全与环境工程, 2009, 16(5): 13 - 16.

Optimization of Air Dam Skirts of the Front-Wheels of a Car Based on Kriging Model

GUO Jian-cheng¹, GU Zheng-qi^{1,2}, RONG Jiang-lei¹, ZHANG Qing-lin¹

(1. State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacture for Vehicle Body, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Party Committee Hunan University of technology, Zhuzhou 412008, China)

Abstract: The air dam skirts of the front-wheels of a certain car were optimized by combining data optimization method and CFD simulation. The height and the installation coordinate of the air dam skirts were chosen as the variables and 20 groups of sample data were adopted by the method of DOE. The response values corresponding to the sample were achieved by CFD simulation, and then Kriging model was established. The credibility of the model was verified and global optimization was carried out by multi-island genetic algorithm. The result showed that the aerodynamic drag could be reduced by 4.23% at the most, from 827.4 N to 792.4 N, based on the prerequisite that the aerodynamic lift wouldn't be increased. And when the weight was set at 0.85 and 0.15 separately, the aerodynamic drag could be decreased by 3.70% to 796.8 N while the aerodynamic lift could be reduced by 6.55% to 382.6 N.

Key words: air dam skirts of front-wheel; CFD simulation; design of experiment; Kriging model; multi-island genetic algorithm