

某两厢车气动外形减阻自动优化设计

张英朝, 薛学栋, 丁伟, 肖宏伟

(吉林大学 汽车仿真与控制国家重点实验室, 吉林 长春 130022)

摘要: 以某两厢车为研究对象, 对其造型阶段气动外形进行优化. 为了提高气动减阻优化效率, 避免优化的盲目性, 应用优化软件、网格变形软件、流体分析软件搭建了一个自动优化流程. 优化流程可以实现对多个变量多个水平同时进行优化, 中间过程不需要人为参与, 最终可以输出减阻效果最佳的气动组合方案.

关键词: 造型阶段; 气动减阻优化; 自动优化流程

中图分类号: TP15

文献标志码: A

Automatic Shape Optimization of Hatchback to Reduce Aerodynamic Drag

ZHANG Yingchao, XUE Xuedong, DING Wei, XIAO Hongwei

(State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: Taking a hatchback car as the research object to optimize its aerodynamic performance on styling stage, this paper was devoted to improve the efficient of optimization and reduce the blindness in aerodynamic drag reduction and optimization. By applying morphing software, optimization software, and fluid analysis software, an automatic optimizing process was developed, which could optimize different variables and levels at the same time even when there are no people involved, and finally bring up the best drag reduction scheme in combination.

Key words: styling stage; aerodynamic drag reduction; automatic optimization process

汽车的气动特性直接影响汽车的燃油经济性, 气动阻力与车速的平方成正比, 即随着车速的升高, 气动阻力所消耗的能量占总消耗的比例会越来越大, 所以降低汽车气动阻力可以显著降低油耗. 降低汽车气动阻力最主要的方式就是对汽车进行气动外形的优化. 传统优化方法是一个迭代的过程, 即设计

师先提出初始模型, 工程师对几何模型进行计算流体力学(CFD)^[1]分析并提出减阻方案, 设计师对原始模型进行再修改, 修改后的模型再交由工程师进行气动特性评估. 该过程需要多次循环, 耗费大量的人力物力, 设计周期长, 且受限于工程师的专业知识和以往经验. 由于变量间的交互影响, 只能单个变量逐次优化, 很难实现整车多变量综合最优化. 针对传统优化的局限性, 国外的一些公司开始自动优化的相关研究. 2003年, 通用公司的 Rajineesh Singh 和 PPI 公司的 Kevin Golsch 研究利用网格变形技术对计算网格修改达到优化改型的目的. 2011年, FIAT 公司利用优化软件 modeFRONTIER 同时考虑气动特性和人机工程进行了多目标自动优化. 国内对于自动优化的研究较少, 主要涉及航天及高速列车的气动外形优化. 湖南大学谷正气在 2010 年利用自己搭建的优化流程对卡车导流罩进行了自动优化. 综合来看, 国外针对汽车造型自动优化技术的探索和研究较多, 但是在造型初期就应用自动优化对整车气动阻力进行控制的研究很少, 国内起步比较晚并且很少涉及整车气动造型优化, 也没有进行工程应用.

本文将自动优化流程应用于某两厢车的造型阶段, 通过分析 CAD 模型的外流场确定输入自动优化的变量, 并根据自动优化计算得到多变量全局最优结果, 整个流程耗时较短, 中间过程不需要人为参与, 有助于加快汽车外造型的设计周期.

1 研究内容及研究方法

1.1 研究内容

针对目前国内的工程实际情况和企业需要, 结合国内外的研究现状, 开发了一个应用于造型阶段的自动优化流程, 将其应用到造型初期的三维建模

收稿日期: 2015-11-25

第一作者: 张英朝(1978—), 男, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为汽车空气动力学. E-mail: yingchao@jlu.edu.cn

通讯作者: 薛学栋(1990—), 男, 硕士生, 主要研究方向为汽车空气动力学. E-mail: xuedong9077@gmail.com

环节,实现了对车辆外形的快速优化.以一款两厢车造型设计方案为例,利用自动优化流程减小车身设计变量对气动阻力的影响,使其气动阻力大幅降低,同时保证其造型风格不变^[2].

1.2 研究方法

首先建立初始模型,在初始模型的基础上进行CFD分析确定设计变量,使用网格变形技术实现设计变量的参数化^[3].依托专业的试验设计(DOE)算法建立设计空间,同时根据数学算法建立可信的近似模型,通过近似模型拟合出各个设计因素对影响变量的影响趋势,进而得到优化解.

2 初始模型建立及 CFD 分析

2.1 建立初始模型

根据产品定位确定两厢车的基本尺寸,并根据美观、时尚的设计风格确定了如图1所示的初始模型设计方案.

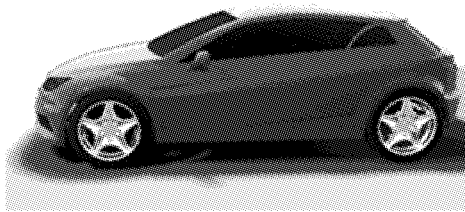


图1 初始模型渲染图

Fig.1 Initial model renderings

2.2 通过 CFD 分析确定设计变量

为了确定优化设计变量,本文对初始模型进行CFD分析.根据汽车实际行驶特性,设定计算域入口风速为 $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,湍流模型选择 $k-\epsilon$ (Realizable K-Epsilon)湍流模型^[4],体网格数为800万.经过4000步迭代计算,总计150 CPU小时,达到收敛,气动阻力系数 $C_d=0.319$,误差波动在0.06%左右.

为了确定影响气动阻力的因素,对计算结果进行后处理得到中心对称面上的压力云图(图2)以及湍流动能图(图3).由图2可以看出,气流流经发动机盖前沿以及接近角部分负压较为严重,说明在此处产生了分离,在图3中这两部分也出现了明显的湍流;图2中气流流经发动机盖与前风窗交汇处时,气流受到阻滞,气压上升,由于折角原因此处也在图3中也产生了部分湍流;在图2中车尾部的压力明显降低,这是因为气流在尾部分离造成此处处于低压区,由图3也可以看出湍流主要区域也是尾部,能量耗散比较严重,所以尾部的设计变量的修改会直接

影响到汽车的气动阻力.根据以上分析确定了需要考虑发动机盖倾角、前风窗倾角、接近角、顶盖后缘高度、后风窗倾角、尾部收缩量共6个设计变量.

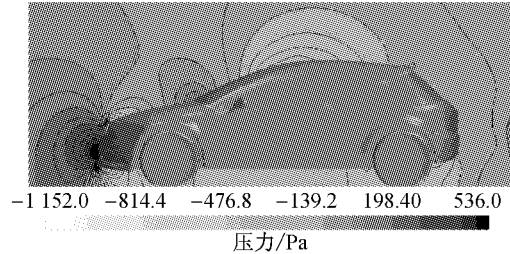


图2 中心对称面上的压力云图

Fig.2 Pressure on the central plane of symmetry

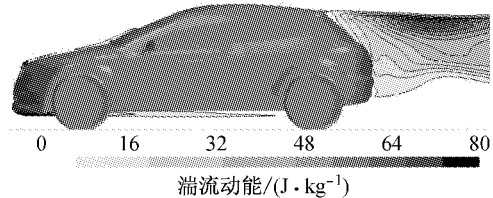


图3 中心对称面上的湍流动能图

Fig.3 Turbulent kinetic energy on the central plane of symmetry

3 整车气动外形自动优化设计

3.1 设计变量参数化

本文在原有模型的基础上通过网格变形技术对以上6个设计变量进行参数化调整,根据德国的Hucho, Janssen和Emme-Lmann等人提出的汽车设计应首先服从工程需要的原则,即首先要保证总布置、安全、舒适及造型要求,然后进行空气动力学修正^[5],所以本文在设置变形范围时,考虑到造型风格以及总布置的要求,未设置较大变形,同时考虑到优化参数可能高于或者低于原始值,所以设定的参数范围涵盖原始值前后.主要的设计变量如图4所示,前风窗倾角的原始角度为 33° ,变形范围是 $[28^\circ, 35^\circ]$.发动机盖倾角的原始角度为 12° ,设置的变形范围是 $[9^\circ, 15^\circ]$.接近角的原始角度为 4° ,设置的变形范围是 $[0^\circ, 10^\circ]$.后风窗倾角的原始角度为 45° ,设置的变形范围是 $[35^\circ, 60^\circ]$.顶盖后缘的原始高度为 1.165 m ,设置的变形范围是 $[1.088 \text{ m}, 1.242 \text{ m}]$.车尾部设置的最大变形程度是车尾部宽度收缩到原始状态的90%.

3.2 建立优化流程

整个优化流程包括:试验设计,建立DOE矩阵^[6];对矩阵中每一个组合进行CFD计算得到相应

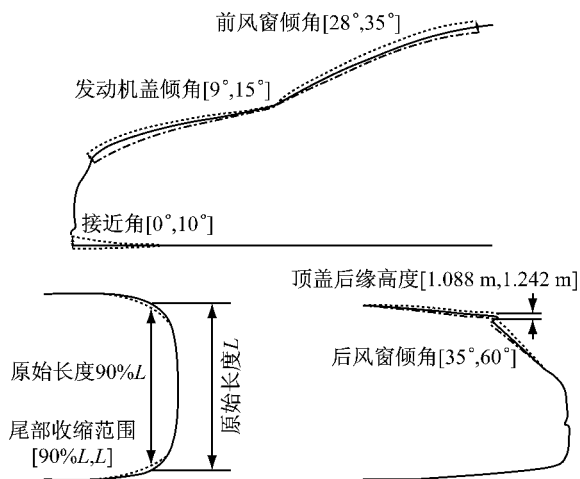


图 4 变形位置示意图

Fig.4 Diagram of deformation

的 C_d 值;利用 DOE 矩阵建立近似模型,它能拟合出响应变量与各个设计变量之间的关系曲线;选择合适的优化算法,根据近似模型进行寻优,并最终对最优解进行验算,以判断其精度.图 5 所示为使用网格变形软件 Dep Meshworks、计算流体动力学软件 STAR-CCM+ 及相关优化理论算法在优化软件 Isight 中搭建的自动优化流程.

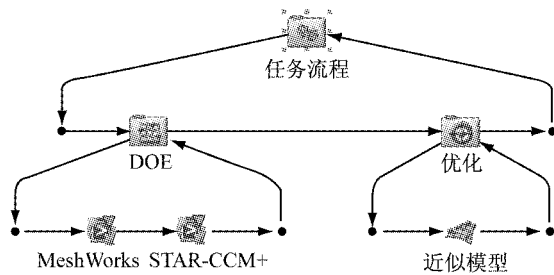


图 5 优化流程

Fig.5 Optimization processes

3.2.1 实验设计

本次实验设计 (DOE) 包含 6 个设计变量,每个变量设置了 42 个水平.采用传统迭代优化的方式需要 $6 \times 42 \times 150 = 37800$ CPU 小时.为了减少计算量,本文结合最优拉丁超立方算法 (optimal Latin hypercube design)^[7] 建立包含 42 组试验的 DOE 矩阵,只需要 $42 \times 150 = 6300$ CPU 小时,通过对比可以看出自动优化消耗的计算资源是传统优化的 1/6.通过对 DOE 矩阵进行计算处理,得到如图 6 所示的 Pareto 示意图和图 7 所示的主因素图.通过 Pareto 图可以得到各设计变量对气动阻力的贡献比例,结合主因素图可以得到设计变量对气动阻力影响程度由大到小依次是:顶盖后缘高度 > 接近角 > 后风窗倾角 > 尾部收缩 > 发动机罩倾角 > 前风窗倾角,而

且接近角是起反效应作用.同时这些结果也反映了车身尾部对气动阻力的影响要大于车身前部.

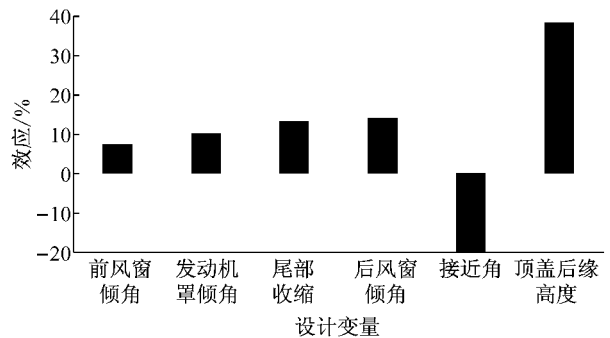


图 6 Pareto 示意图

Fig.6 Schematic diagram of pareto

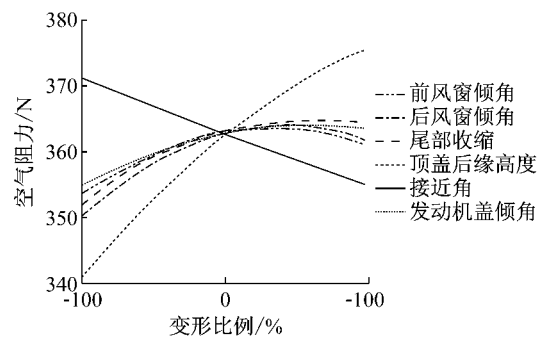


图 7 主因素图

Fig.7 Schematic of main factors

根据实验设计得到变量间交互影响最小和最大的变量分别为发动机盖倾角与后风窗倾角、后风窗倾角与尾部收缩,如图 8、图 9 所示.图 8、9 中两条曲线相交趋势越明显表明两个设计变量间交互作用程度越大,图 8 中发动机盖倾角与后风窗倾角的相交趋势很弱,所以两个变量间几乎没有交互影响,而图 9 中后风窗倾角和尾部收缩的交互影响则比较明显,此交互影响可以为后续的设计量间的互补优化提供参考.

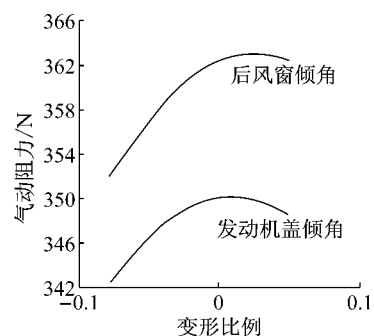


图 8 发动机盖倾角与后风窗倾角的交互影响

Fig.8 Interaction between hood tilt angle and rear window inclination angle

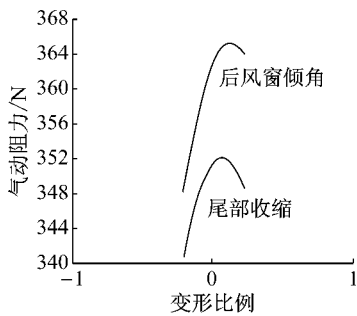


图 9 后风窗倾角与尾部收缩的交互影响
Fig.9 Interaction between hood tilt angle and tail shrinkage

3.2.2 建立近似模型

根据实验设计(DOE)利用径向基(RBF)神经网络算法^[8]拟合出本次工作的近似模型,通过计算得

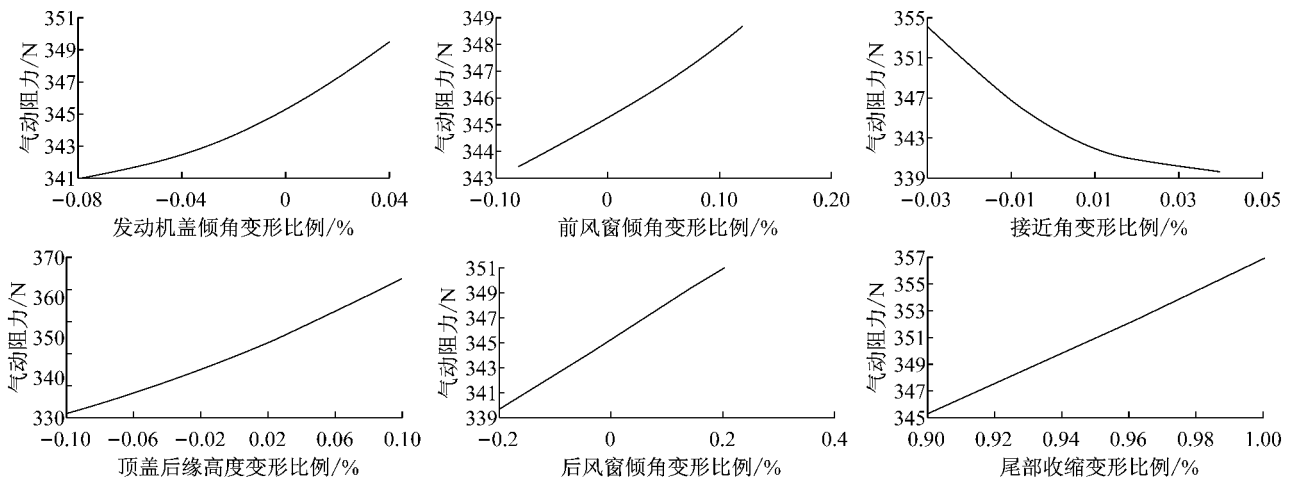


图 10 气动阻力与各个设计变量之间的拟合曲线

Fig.10 Curve of fitting aerodynamic drag and respective design variables

3.2.3 近似模型寻优及可靠性验证

整车优化工作中涉及的 6 个变量均是实数型,求解的问题是连续变量函数的极小值问题.因此采用自适应模拟退火法(ASA)^[9]作为优化计算的算法.以气动阻力值最小为目标,气动升力系数处于某

到拟合精确度 R^2 为 0.953,超过标准值 0.9,符合精度要求.图 10 表示气动阻力与各个设计变量之间的拟合曲线.根据拟合曲线,可以得出以下结论:

(1)从线性与非线性的角度来看,气动阻力与发动盖倾角、前风窗倾角、接近角以及顶盖后缘高度均是非线性关系,与后风窗倾角及尾部收缩则近似于线性关系.

(2)从递增和递减趋势来看,随着接近角变形取值的增加,气动阻力不断减小,而对于其余 5 个设计变量,随着取值的增加,气动阻力均是增大的趋势.这反映了接近角对阻力的影响为负效应,而其余变量对阻力影响为正效应,与之前得到的 Pareto 图和主因素示意图得到的结论是一致的.

一范围内为约束,根据径向基神经网络近似模型,得到表 1 所示的优化解.验算结果表明,气动阻力预测值与真实计算值之间的误差为 0.47%,误差很小,说明结果可信.相对于原始模型,优化后模型其气动阻力系数有 10.34%左右的降幅,减阻效果可观.

表 1 优化结果统计

Tab.1 Optimization results

| 接近角/ (°) | 发动机罩 倾角/(°) | 前风窗 倾角/(°) | 顶盖后缘 高度/m | 后风窗 倾角/(°) | 尾部收 缩/% | 预测阻 力值/N | 计算阻 力值/N | 误差/ % |
|-------------|----------------|---------------|--------------|---------------|------------|-------------|-------------|----------|
| 10 | 14 | 34 | 1.088 | 33.5 | 90 | 319.89 | 318.40 | 0.47 |

4 优化前后对比

图 11 所示为中心对称面上的压力分布对比.整体来看,在优化模型中接近角部分和发动机盖前部分颜色变浅,说明该处的气流分离情况得到控制;优化模型前风窗倾角增大以及顶盖后缘高度的降低

使得前风窗与顶盖交汇处造型向外突出,导致气流经前风窗过渡到顶盖后不能迅速贴合,造成顶盖区域压力进一步降低,因此这部分阻力有所升高;在优化模型背部区域,后风窗部分的压力有所减小,该处负压的加剧表明此处湍流情况没有得到改善;而在行李舱盖部分,压力则有所上升,该处压力上升使得车身后后的压差减小,从而使气动阻力有所减小.

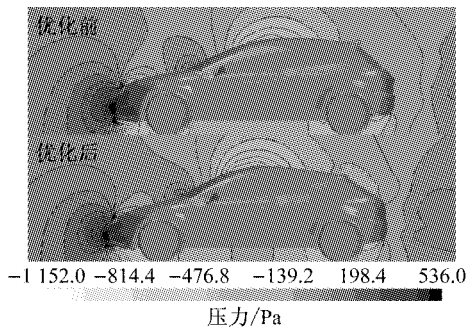


图 11 中心对称面上的压力云图对比

Fig.11 Pressures contrast on the central plane of symmetry

图 12 为纵向中心对称面上的湍流动能分布,其中湍流情况有明显改善的是整个车身底部以及尾部的湍流区域^[10]. 接近角部分流场的改善使气流在底部的分离情况得到控制,因此底部的湍流情况显著改善. 在初始模型中顶盖后缘(包括扰流板部分)近似与地面平行,这导致气流脱离之后不能趋向于地面,而是向四周发散,因此初始模型中上、下部分的气流不能收敛,在竖直方向上扩散,导致尾流区域较大^[7]. 在优化模型中,由于顶盖后缘高度的降低,引导气流向地面流动,上部气流与下部气流汇合收敛一起流向地面直至消失,这使得尾流区范围大大减小,最终导致气动阻力显著下降. 图 13 为水平面上的尾流区域速度矢量. 很明显,在初始模型中尾部涡流区域主要有 1 和 2 两个,而且区域 3 的流动较紊乱;在优化模型中,涡流的数量虽增加到 4 个,但它们的范围都较小,而且在区域 5(即初始模型中的区域 3)中,流动趋于一致,有所改善. 总体而言,水平方向上湍流情况改善有限.

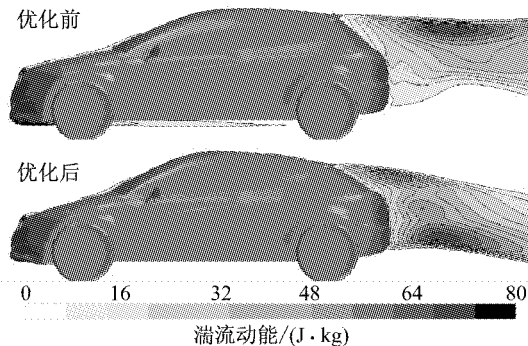


图 12 中心对称面上湍流动能对比

Fig.12 Turbulent kinetic energy on the central plane of symmetry

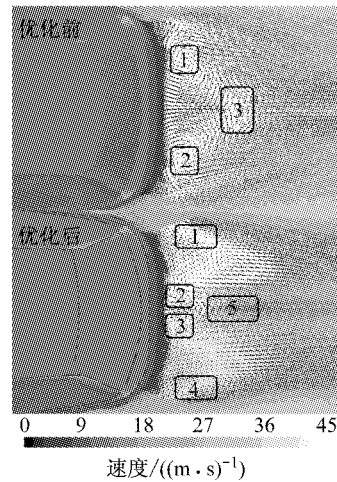


图 13 距离地面高度 0.4 m 横截面速度矢量图

Fig.13 Velocity vector on cross-section of 0.4 m from the ground

5 结论

(1) 本文根据气动外形设计的流程,结合计算机辅助造型(CAS)、计算流体动力学(CFD)、网格变形技术(Morpher)和优化方法等多种数字化仿真设计手段建立了一个汽车气动外形的自动优化流程.

(2) 利用建立的流程对 6 个设计变量进行最优匹配,整个优化流程耗时很短,优化后的模型气动阻力下降了 10.34%. 这样的结果可以为后续的细节优化提供一个较低阻力水平的模型.

(3) 通过自动优化流程确定不同设计变量对阻力贡献的比例,为后续的减阻设计提供依据;同时变量间的交互影响也可以作为互补优化提供参考.

(4) 本文气动外形减阻自动优化追求的是整体减阻效果最佳,局部变量在优化后阻力可能升高也可能降低,但变量间组合起来的减阻效果是最好的.

参考文献:

[1] Satheesh Kandasamy, Bradley Duncan, Holger Gau, *et al.* Aerodynamic performance assessment of BMW validation models using computational fluid dynamics[C/CD]// SAE 2012 World Congress and Exhibition. Detroit: Society of Automotive Engineers, 2012; 2012-01-0297.

[2] Castejon, Danilo Vieira, Fernando Martini Catalano, *et al.* Methods of drag reducing without losing aerodynamic stability applied on SAE reference model[C/CD]// SAE 2011 World Congress. Warrendale: Society of Automotive Engineers, 2011; 2011-36-0079.

(下转第 1795 页)