文章编号:1674-2974(2020)02-0014-07 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2020.02.003

尾部特征参数对气动阻力交互影响与全局优化研究

张勇[1,2],石佳琦[2†],谷正气[1],刘水长[2†],米承继[2]
(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 生物质纤维功能材料湖南省重点实验室,湖南 株洲 412007)

摘 要:汽车尾部结构气动减阻优化时,各几何特征参数间往往存在此消彼长的现象,使得优化变得盲目而复杂.对此,为探明关键几何参数的交互影响规律,以 Ahmed 类车体为研究对象,在 HD-2 风洞试验对标验证基础上,对后背 3 个主要特征参数进行了 CFD 仿真研究,并在此基础上,为克服盲目性,应用集成优化平台对尾部特征参数进行优化设计.结果表明,后背倾角角度对减阻的贡献量最大,背部两侧圆角半径次之,后背顶部圆角半径最小;三者的改变对气动阻力的影响都具有非单调性;当后背倾角角度、后背顶部圆角半径和背部两侧圆角半径分别为 13°、283 mm、58 mm 时,能有效减小气动阻力,减阻率达到 11.76%,为具体车型减阻优化研究提供借鉴.

关键词:尾部特征;交互影响;Ahmed 模型;减阻
中图分类号:U461.1 **文献标志码**:A

Study on Interaction Influence of Tail Characteristic Parameters on Aerodynamic Drag and Global Optimization

ZHANG Yong[1,2], SHI Jiaqi[2†], GU Zhengqi[1], LIU Shuichang[2†], MI Chengji[2]
(1. State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body, Hunan University, Changsha 410082, China;
2. Hunan Key Laboratory of Biomass Fiber Functional Materials, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412007, China)

Abstract: In the aerodynamic drag reduction optimization of automobile tail structure, there is a phenomenon between geometrical characteristic parameters, which makes optimization become blind and complex. In order to ascertain the interaction law of the key geometrical parameters, this paper carried the CFD simulation research of the three main characteristic parameters on the back of the Ahmed model on the basis of the HD-2 wind tunnel experiment. In order to overcome the blindness of optimization, the integrated optimization platform was applied to optimize the tail characteristic parameters. The results show that the angle of the back inclination has the greatest contribution to drag reduction, the two sides rounded corners on the back has the smaller contribution, the contribution of the top corner of the back is the smallest. The influence of the change of three variables on the aerodynamic resistance is non-monotonic. When the values of the angle of the back inclination, the top corner of the back and the two sides rounded corners on the back are 13°, 283 mm and 58 mm respectively, the drag reduction rate reaches 11.76%. This paper provides a reference for the study of the optimization of drag reduction in specific models.

Key words: tail characteristic; interaction effect; Ahmed model; drag reduction

* **收稿日期**:2019-02-08
基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目 (2019JJ60063, 2019JJ60064), Natural Science Foundation of Hunan Province of China (2019JJ60063, 2019JJ60064);湖南省教育厅重点项目(18A270), Key Project of Education Department of Hunan(18A270)
作者简介:张勇(1979—),男,陕西汉中人,湖南大学博士,副教授
† 通讯联系人,E-mail:shijiaqi0215@163.com;289714423@qq.com

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

通过汽车车身三维曲面造型优化，降低气动阻力以提高燃油经济性，是汽车车身设计师的惯用方法. 然而汽车车身是由三维复杂曲面组成的片体结构,尤其是作为湍动能的主要耗散区的汽车尾部,包含了诸多曲面,每个曲面又包含诸多特征参数,改变造型特征某一参数,均会引起周围流场结构的改变,进而对气动特性产生不同影响，即存在着不同几何特征参数气动减阻优化的此消彼长的交互影响,而这种影响具有不确定性，即优化变量的盲目和未知性[1-2],这使得车身减阻成为复杂的优化问题. 目前常用的做法只能依赖于工程师经验，开展大量重复性仿真计算基础上的部分特征参数的优化，不能保证该部位的全局最优.

对此,在不改变汽车车身造型固有风格条件下,对经典的汽车模型尾部特征参数交互影响机理进行分析,开展全局优化研究,以指导具体车型开发,就显得尤为必要.

Ahmed 车型作为经典的斜背车体，常用于汽车空气动力学对标研究[3-6]. Thacker 等[7]对其车顶与后背连接处圆角优化，减阻达到 10%;Grandemange 等[8]对后背倾角角度进行结构优化,使得尾部产生了 4 个纵向漩涡,实现整体减阻 5.8%;Evrard 等[9]使用基腔让尾部产生非对称湍流,减阻达 9%;贺银芝等[10]指出不同后背倾角模型中气流分离特征差异较大,且阻力值随后背倾角增大而提高;倪捷等[11]在背部设置沟槽型棱纹仿生结构进行优化，使阻力值降低 5%. 这些研究表明，优化尾部特征参数对减阻具有积极意义,但车体结构具有三维特征,以上研究未涉多个参数交互影响作用，因而无法保证优化参数为最优,即未获得全局最优.

对此,本文以 Ahmed 模型为研究对象,应用数值仿真模拟，对影响尾部造型的 3 个主要特征参数进行气动减阻交互影响研究，并在此基础上开展全局优化.

1　研究方案

1.1　原始模型与风洞试验

本文采用原始斜背角为 25°的 Ahmed 1∶1 模型开展研究,其基本尺寸如图 1 所示(单位:mm).

为验证数值仿真方案的精度，对该模型进行 HD-2 风洞试验对标验证,其试验现场如图 2 所示.

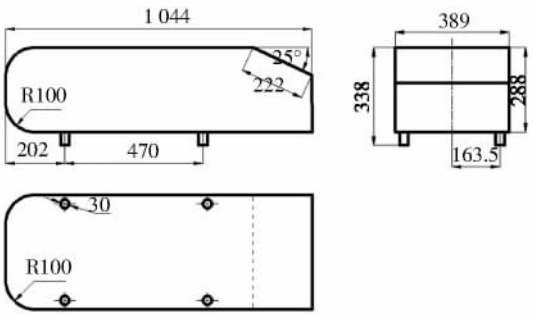


图 1　1∶1 比例 25°斜背角 Ahmed 模型

Fig.1　Ahmed model with 25° slant angle

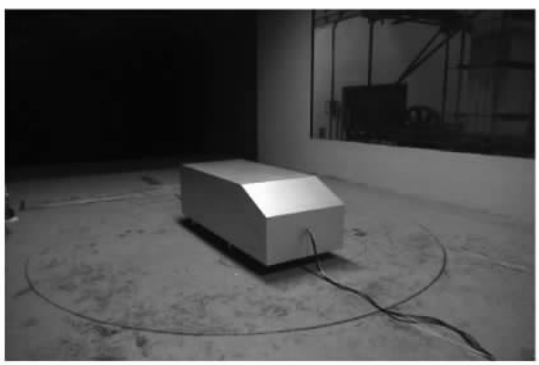


图 2　风洞试验图

Fig.2　Wind tunnel experiment

1.2　原始模型数值仿真与风洞试验验证

网格划分采用四六混合网格（网格纵对称剖面如图 3 所示），网格数量和节点分别达到 500 万和 200 万. 仿真以 ANASYS 14.0 为求解器,采用隐式求解、标准壁面函数、二阶中心差分法;速度项、紊动能项和紊黏系数项采用二阶迎风差分格式. 其外流场仿真边界条件如表 1 所示.

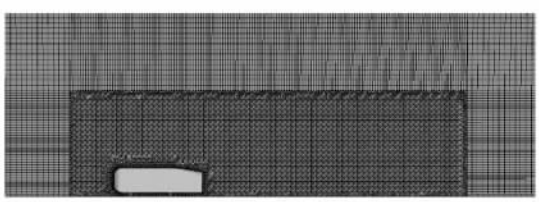


图 3　纵对称剖面网格分布

Fig.3　Grid distribution in the vertical plane of symmetry

按图 3 所示的网格模型、表 1 所示的边界条件和 K-E 湍流模型进行数值仿真求解,得到该模型气动阻力系数 C_d 为 0.305 3;按图 2 所示的 HD-2 风洞试验所测得的风阻系数为 0.298 5，两者的相对误差为 2.3%,表明了仿真方案的可靠性.

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 1 边界条件

Tab.1 Boundary conditions

计算域边界		边界条件设置
入口	速度入口 V	30 m/s
	湍流强度(σ/V)	0.5%
	水力直径($4A/P$)	2.08 m
出口	压力出口	1.01×10^5 Pa
	湍流强度(σ/V)	5%
	水力直径($4A/P$)	2.08 m
地面边界		滑移壁面
车身壁面		固定壁面
其余壁面		对称壁面

注:σ 为湍流脉动速度;V 为平均速度;A 为过流断面面积;P 为过流断面周长.

2 交互影响研究

Ahmed 车型是斜背两厢车的基本模型，在保证该模型固有主体尺寸不变条件下,后背倾角角度、后背顶部圆角半径和背部两侧圆角半径 3 个参数影响着其流场结构. 为此本文对这 3 个参数的气动减阻交互效应进行研究.

2.1 影响参数约束条件

1）设后背倾角角度 α 为特征参数 A. 为保持整车造型不发生太大改变,Dumas[12]给出了一个参考范围,为 $5° \leqslant \alpha \leqslant 40°$.

2）设后背顶部圆角半径为特征参数 B. 当 α 角为 40°且圆角倒至后背边界处时，圆角半径为 812 mm,取整后变量 B 为 $50\ \text{mm} \leqslant B \leqslant 800\ \text{mm}$.

3）设背部两侧圆角半径为特征参数 C. 根据 Cheng[13]的研究,两侧边缘由棱角变为圆角时,对车辆尾部流场影响最大，为观察此影响，又考虑到车辆尺寸,变量取值范围不宜太大,定为$10\ \text{mm} \leqslant C \leqslant 100\ \text{mm}$.

3 个特征参数示意图如图 4 所示.

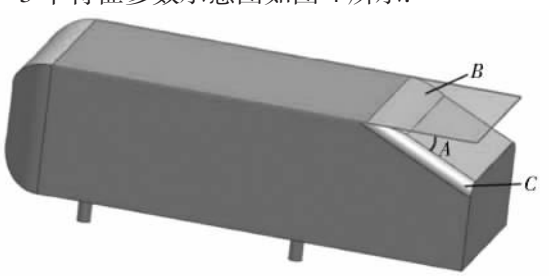


图 4 特征参数示意图

Fig.4 Feature parameter schematic

2.2 试验设计

为辨识 3 个特征参数的交互影响规律，采用优化拉丁超立方法生成样本点来进行试验设计. 该方法改变了随机拉丁超立方设计的均匀性，使因子和响应拟合更为精确，且具有非常好的填充空间均衡性. 根据 3 个变量因子，为减小仿真过程的误差,提高模拟仿真的准确度，试验研究中取 50 组样本点，依据样本点生成相应的数字几何模型，分别对其进行网格划分和数值仿真计算以获得气动阻力系数 C_d(数值仿真方案与 1.2 节相同).

在整个试验仿真研究过程中，必须经过参数化几何建模、网格划分、CFD 流场计算、优化设计等过程,费时费力. 对此,基于 UG 二次开发实现几何模型数据交换，以脚本文件对 ICEM 建立自动网格划分命令，建立的操作日志文件可实现 CFD 边界条件、控制方程和参数调用等功能. 然后在 Isight 软件中[14],采用批处理文件实现几何模型修改、网格划分、流体分析计算 3 个环节的数据调用、启动、关闭等操作，从而建立高效的集成优化技术. 详细过程见文献[15].

2.3 交互影响分析

2.3.1 阻力的交互影响分析

研究特征参数对气动阻力影响,转化为对 C_d 的贡献量分析. 分析应分 3 个层次,即:独立特征参数变化对 C_d 的贡献量、相邻两个特征参数变化对 C_d 的贡献量交互效应、3 个特征参数变化对 C_d 的贡献量交互效应.

根据试验设计样本进行数值仿真，计算获得如图 5 所示的汽车尾部 3 个特征参数独立变化对气动阻力的一维贡献百分比 Pareto 图. 该图反映了各变量对响应 C_d 的贡献程度百分比,横坐标为贡献量百分比,依照不同特征参数的贡献量绝对值大小,从上至下依次排列. 由图 5 可见,特征参数 A 对气动阻力的影响为正效应，而特征参数 B 和 C 的变化对气动阻力的影响为负效应. 进一步分析为随着特征参数 A 的增大，引起 C_d 相对增大，正向影响率最大可达 51%;特征参数 C 增大,引起 C_d 相对减小,最大产生负向影响可达 42%；特征参数 B 产生的负向影响仅为 7%.

然而特征参数的独立变化对 C_d 的贡献量分析，仅表征了 3 种特征参数理想条件下的主次因素,而实际上 3 个特征参数一旦变化，必然导致造型结构

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

的变化. 因此,应进一步分析 3 个特征参数之间对气动阻力 C_d 的交互效应.

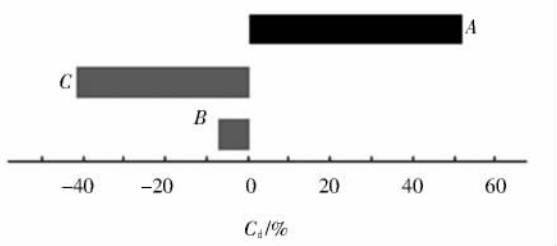
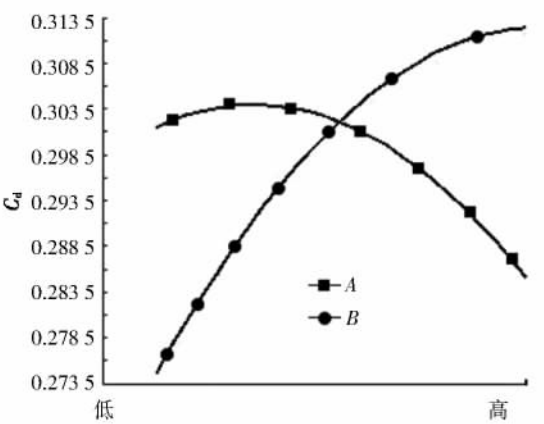


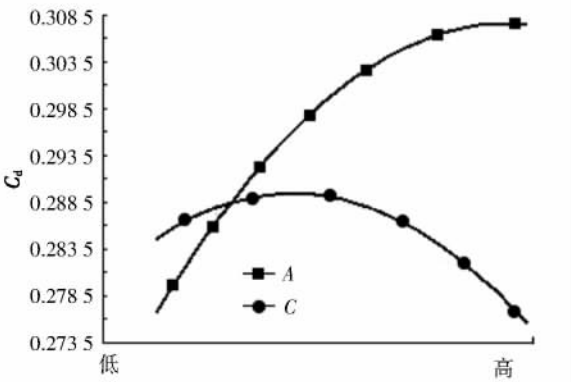
图 5　特征参数独立变化对 C_d 贡献百分比 Pareto 图

Fig.5　The percentage of C_d with characteristic parameters Pareto figure

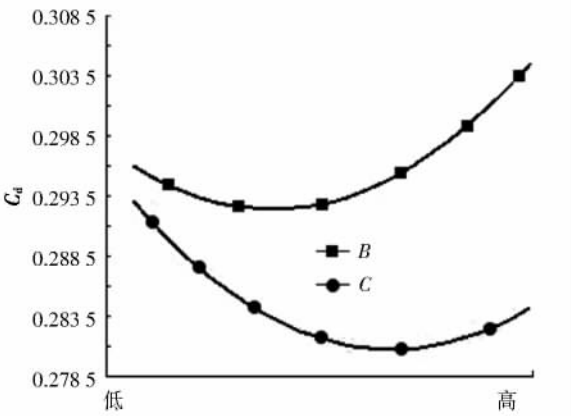
图 6 为 A、B、C 3 个特征参数两两之间的交互效应图. 其中纵坐标为模型的 C_d 值，横坐标为各特征参数从低到高的取值，由于 3 个特征参数间的取值和单位不统一,归一化后横坐标无单位量纲. 交互效应图反映了两个特征参数交互性对响应 C_d 的关联程度,它是在第 2 个特征参数取不同水平的情况下,分别绘制第 1 个特征参数对响应的主效应图，然后叠加而成. 如果交互效应图中的 2 条线相互平行,则表示这 2 个特征参数无交互作用；如果 2 条线不平行,则表示有交互作用,不平行的程度反映了交互效应的强弱. 由图 6(a)(b)可见,两条线交叉,且图 6(a) 中 2 条线的不平行性更加明显，说明 A 与 B、A 与 C 间均存在交互效应,且 A 与 B 的交互效应更加强烈,即后背倾角与后背顶部圆角、后背倾角与背部两侧圆角均存在交互效应，且前者的交互效应更加强烈,即后风窗玻璃与上顶部夹角参数引起的 C_d 变化存在被其余 2 个特征参数分别引起的 C_d 变化抵消的交互效应. 图 6(c)为 B 与 C 的交互效应图,图中 2 条线没有出现交叉，说明后背顶部圆角半径与背部两侧圆角半径的交互效应较弱.



(a)A 与 B 间的交互效应



(b)A 与 C 间的交互效应



(c)B 与 C 间的交互效应

图 6　交互效应曲线

Fig.6　Interaction effect curve

为进一步分析 3 个特征参数变化引起的 C_d 响应，图 7 给出了 A、B、C 3 个特征参数间的交互效应图,由于是 3 个特征参数间的交互影响,因此是主效应图. 由图 7 可见,3 个特征参数间存在明显的相互交叉，且纵坐标值随 3 个特征参数的变化均为非单调函数,进一步证明了不同特征参数改变时,对风阻系数存在着显著的此消彼长的交互影响，即说明单一特征参数优化后,并不能获得气动阻力全局最优.

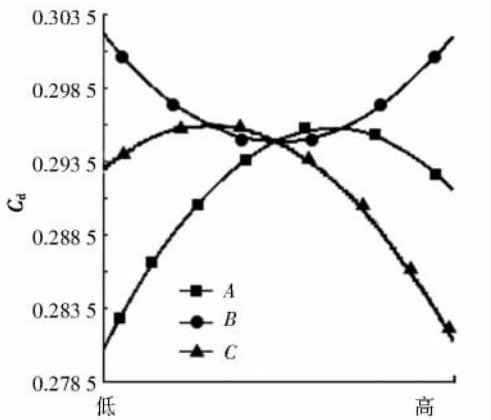


图 7　主效应曲线

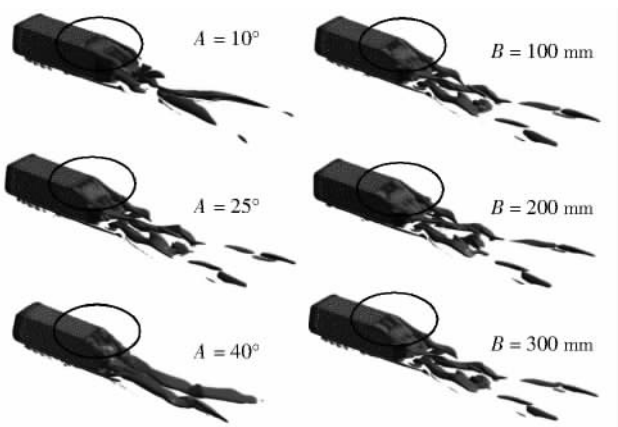
Fig.7　Main effect curve

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

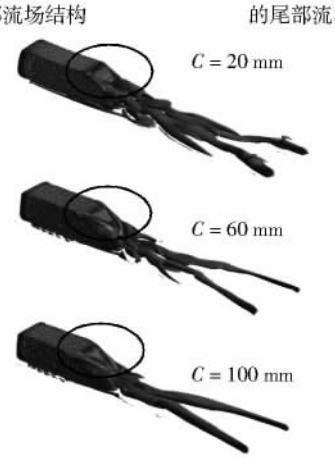
2.3.2 流场结构影响分析

为了分析 3 个特征参数变化引起的流场结构变化，图 8 为改变单一特征参数而其余两项保持不变情况下的车身涡流结构(采用 Q 准则). 图 8(a)为后背倾角 A 变化时的尾部流场结构. 由图 8(a)可见，随着 A 角度的增大，涡核(深色区域)越来越靠近车辆尾部，纵向涡强度增大，湍流涡结逐渐覆盖整个背部. 涡核靠近尾部使得压差阻力增大，纵向涡强度增大又使得阻力减小，在涡核与纵向涡的交互作用下，后背流场结构变得复杂.

图 8(b)为后背倾角为 25°，特征参数 B 变化时的尾部流场结构. 由图 8(b)可见，增大顶部圆角半径对尾部涡结影响不大，涡核位置及涡结强度无明显改变. 但圆角抑制了后背气流分离现象，圆角越大，气流依附性愈加明显(如图 8(b)中圈内后背气流附着面积).



(a)特征参数 A 变化时的尾部流场结构　(b)特征参数 B 变化时的尾部流场结构



(c)特征参数 C 变化时的尾部流场结构

图 8 单一特征参数变化时的尾部流场结构

Fig.8 The tail vortex structure when the single characteristic parameter changes

图 8(c)为后背倾角角度为 25°，特征参数 C 变化时的尾部流场结构. 由图 8(c)可见，随着背部两侧圆角半径增大，气流顺着倒角附着于后背现象明显，呈现“V”型结构，导致后背压强增大，“V”字型气流流至尾部形成两个旋转方向相反的纵向涡.

3 全局气动减阻寻优

由上述分析可见，对汽车尾部进行减值优化时，3 个特征参数对气动阻力 C_d 值有显著的交互效应. 因此单一参数的优化并不能获得在保证车身原有造型风格条件下的全局最优值，需要进行尾部的全局寻优.

3.1 全局气动低阻寻优

在进行尾部全局优化时，由于 3 个特征参数对气动阻力的影响存在交互效应，因而构建低阻目标函数可能存在多峰性、非线性和不可微性. 梯度优化算法和直接搜索法无法得到全局最优解，因而采用多岛遗传算法寻优，约束条件仍以 2.1 节中影响参数约束条件为准.

尾部全局气动低阻寻优以 Isight 为集成优化平台，搭建优化流程如图 9 所示，优化目标为参数约束条件下的气动阻力系数 C_d 最小值，设定种群个数为 10，代数为 10. 最终寻优结果为：A 值为 13°，B 值为 283 mm，C 值为 58 mm 时，气动阻力系数 C_{dmin} 为 0.269 4. 此时，对比原始模型，采用全局气动低阻优化，在尾部关键参数最优解集$\{A,B,C|13,283,58\}$时，实现减阻 11.76%.

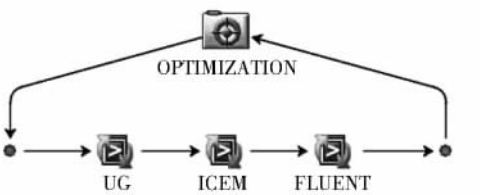


图 9 Isight 优化流程

Fig.9 Optimization process of Isight

3.2 优化结果分析

根据在尾部关键参数最优解集 $\{A,B,C|13,283,58\}$重新修改模型，可得尾部全局优化后的模型如图 10 所示.

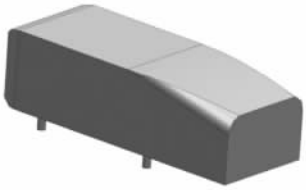
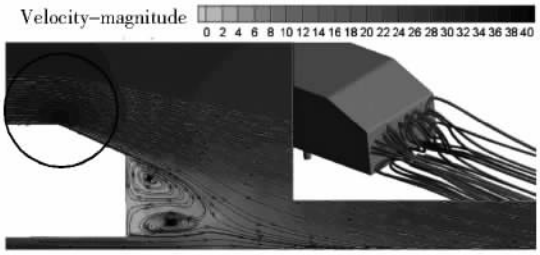


图 10 尾部全局最优 Ahmed 模型

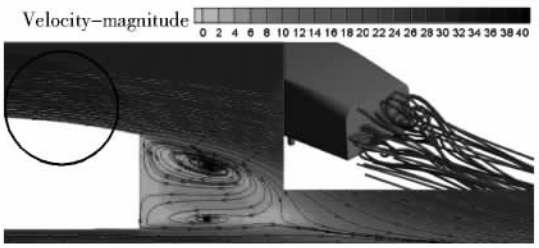
Fig.10 The trailing global optimal Ahmed model

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

由图 10 可见,尾部造型结构相对圆润,且背部两侧圆角半径为渐变型. 对尾部全局最优模型与原始模型进行对比,对比的尾涡迹线图、湍流强度图、压力云图分别如图 11、图 12、图 13 所示.



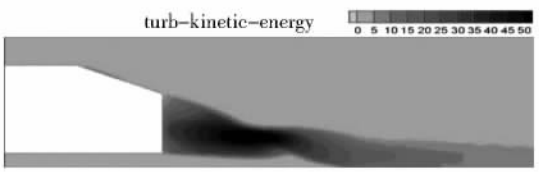
(a)原始模型



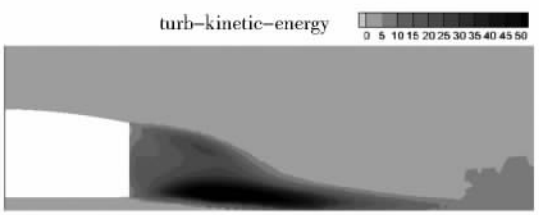
(b)优化后模型

图 11　尾涡迹线图

Fig.11　Streamlines of tail vertex



(a)原始模型



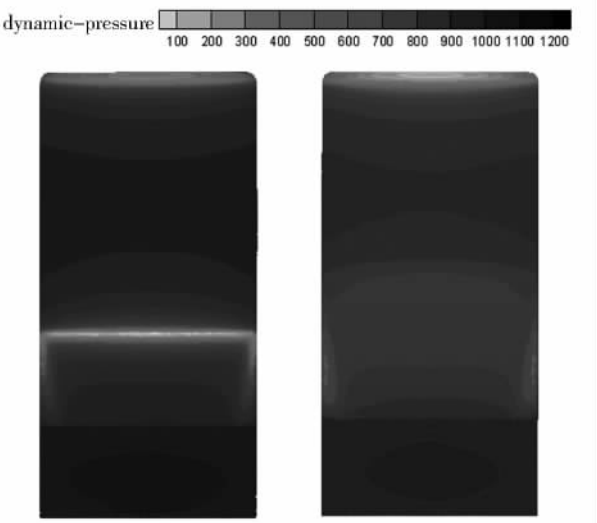
(b)优化后模型

图 12　湍流强度图

Fig.12　Turbulence intensity

图 11 中,原始模型在背部顶角位置处发生气流分离，而优化后模型气流流动顺畅；从尾部涡结来看,原始模型尾涡涡核位置靠近模型尾部,而优化后模型涡核位置远离车身尾部，有利于推迟气流分离以降低气动阻力.

由图 12 可知,图 12(a)中尾部的湍流场强度明显大于图 12(b)中尾部的湍流场强度,这就意味着优化后的模型湍动能耗散减弱,有利于气动减阻.



(a)原始模型　　(b)优化后模型

图 13　压力云图

Fig.13　Stress nephogram

对比图 13 原始模型与优化后模型背部车身表面压力云图可见，优化后模型的整体表面正压较原始模型明显减小，表明压差阻力减小使得整体阻力降低.

4 结　论

本文针对汽车尾部结构进行气动减阻优化时，各几何特征参数间往往存在此消彼长的现象，使得优化变量盲目而复杂，以 Ahmed 类车体为研究对象，研究了模型尾部的 3 个特征参数对气动阻力交互影响的规律，并应用尾部全局优化计算进行低阻寻优,得到以下结论:

1)后背倾角角度、后背顶部圆角半径和背部两侧圆角半径 3 个特征参数对气动阻力影响值不同,其中后背倾角角度的减阻贡献量最大，影响率可达 51%;背部两侧圆角半径影响次之;后背顶部圆角半径影响最小.

2)后背倾角角度与后背顶部圆角半径、后背倾角角度与背部两侧圆角半径特征参数之间，对气动阻力的影响均具有明显的交互效应，其中前者的交互效应更加明显；后背顶部圆角半径与背部两侧圆角半径的交互效应较弱. 三者改变对气动阻力的影响均具有非单调性.

3)在保证原有整体造型风格不变条件下,采用尾部全局优化技术,获得较佳的后背倾角角度、后背顶部圆角半径和背部两侧圆角半径 3 个参数，可有

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

效抑制背部、推迟尾部的气流分离,减小压差阻力,实现最大减阻 11.76%.

以上结论为汽车车身造型优化以实现气动减阻寻优提供了方法与参考.

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,2005:58-151.
GU Z Q. Automobile aerodynamics [M]. Beijing:China Communications Press,2005:58—151.(In Chinese)

[2] 梁敏,谷正气,张勇,等. 基于硬点-骨架约束的汽车低阻曲面优化研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2015,39(4):852—856.
LIANG M,GU Z Q,ZHANG Y,*et al*. Study of automobile low resistance surface optimization based on hard points-skeleton constraint [J]. Journal of Wuhan University of Technology(Transportation Science and Engineering),2015,39(4):852—856.(In Chinese)

[3] JOSEPH P,AMANDOLÈSE X,AIDER J L. Drag reduction on the 25 slant angle Ahmed reference body using pulsed jets [J]. Experiments in Fluids,2012,52(5):1169—1185.

[4] WANG X W,ZHOU Y,PIN Y F,*et al*. Turbulent near wake of an Ahmed vehicle model[J]. Experiments in Fluids,2013,54(4):1—19.

[5] WANG H,ZHOU Y,ZOU C. Aerodynamic drag reduction of an Ahmed body based on deflectors[J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics,2016,148:34—44.

[6] 张英朝,杜冠茂,朱会,等. 25°Ahmed 模型射流主动控制气动减阻策略 [J]. 同济大学学报 (自然科学版),2018,46(1):100—108.
ZHANG Y C,DU G M,ZHU H,*et al*. Strategy of active flow control to reduce aerodynamic drag with steady jet for 25° Ahmed model[J]. Journal of Tongji University (Nature Science Edition),2018,46(1):100—108.(In Chinese)

[7] THACKER A,AUBRUN S,LEROY A,*et al*. Effects of suppressing the 3D separation on the rear slant on the flow structures around an Ahmed body[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,2012,107/108(6):237—243.

[8] GRANDEMANGE M,CADOT O,COURBOIS A.A study of wake effects on the drag of Ahmed′s squareback model at the industrial scale [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,2015,145:282—291.

[9] EVRARD A,CADOT O,HERBERT V,*et al*. Fluid force and symmetry breaking modes of a 3D bluff body with a base cavity [J]. Journal of Fluids and Structures,2016,61:99—114.

[10] 贺银芝,吕越,龙良活,等. Ahmed 模型不同后背倾角下的流场及气动噪声研究[J]. 同济大学学报(自然科学版),2017,45(7):1022—1029.
HE Y Z,LÜ Y,LONG L H,*et al*. Investigati-on of flow characteristics and aerodynamic noise for an Ahmed body with different rear slant angles [J]. Journal of Tongji University (Nature Science Edition),2017,45(7):1022—1029.(In Chinese)

[11] 倪捷,刘志强,秦洪懋,等. 车辆仿生结构气动特性分析与优化[J]. 机械设计与制造,2018,3(3):244—247.
NI J,LIU Z Q,QIN H M,*et al*. Analysis and optimization on aerodynamic characteristics for a vehicle with biomimetic structure [J]. Machinery Design & Manufacture,2018,3(3):244—247.(In Chinese)

[12] DUMAS L. CFD-based optimization for automotive aerodynamics [M]. Berlin:Springer,2008:4—7.

[13] CHENG S Y. Aerodynamic stability of road vehicles in dynamic pitching motion[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,2013,122:146—156.

[14] 赖宇阳. Isight 参数优化理论与实例详解[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2012:96—149.
LAI Y Y. Parameter optimization theory and detailed examples[M]. Beijing:Beihang University Press,2012:96—149. (In Chinese)

[15] 潘正宇,谷正气,张勇,等. 汽车 CFD 流场仿真集成高效优化技术研究[J]. 湖南工业大学学报,2018,32(2):31—37.
PAN Z Y,GU Z Q,ZHANG Y,*et al*. Research on the simulation integration and efficient optimizati-on of CFD flow field in automobiles[J]. Journal of Hunan University of Technology,2018,32(2):31—37.(In Chinese)

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net