

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2021.04.001

# 基于近似模型的气动升力优化研究

张勇<sup>1</sup>, 林旗波<sup>1</sup>, 肖业<sup>2</sup>, 毛凤朝<sup>1</sup>, 刘水长<sup>1</sup>, 曾广胜<sup>3</sup>

(1. 湖南工业大学 机械工程学院, 湖南 株洲 412007; 2. 长沙中车智驭新能源科技有限公司, 湖南 长沙 410000; 3. 长沙学院, 湖南 长沙 410082)

**摘要:** 为改善汽车高速行驶时气动升力引起的气动稳定性变差问题, 提出了封闭汽车前轴底部和增加“前齿”附加装置的改进设计方法, 以实现某款轿车优良的气动升力特性。即在风洞实验验证算法精度的基础上, 采用优化拉丁超立方方法进行了样本点设计和采样, 利用 Kriging 代理模型构建了优化设计变量和气动升力系数之间的近似模型, 以前轴升力愈负为优化目标, 采用多岛遗传算法, 对汽车前齿附加装置进行了参数寻优。结果表明: 应用 LBM 求解汽车气动升力, 具有较高的计算精度; 将轿车前轴附近的底部封闭, 可有效改善气动升力特性, 使气动升力约降低 36.4%; 增加宽度和高度分别为 359.54 mm 和 27.46 mm 的前齿后, 汽车的前轴升力系数  $C_{lf}$  为 -0.063 7, 满足实际工程要求。

**关键词:** 汽车气动升力; 近似模型; 前齿; 优化

中图分类号: U461.1

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2021)04-0001-08

引文格式: 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.

## Research on Optimization of Aerodynamic Lift Performance Based on an Approximate Model

ZHANG Yong<sup>1</sup>, LIN Qibo<sup>1</sup>, XIAO Ye<sup>2</sup>, MAO Fengzhao<sup>1</sup>, LIU Shuichang<sup>1</sup>, ZENG Guangsheng<sup>3</sup>

(1. College of Mechanical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;  
2. Changsha CRRC Intelligent Control and New Energy Technology Co., Ltd., Changsha 410000, China;  
3. Changsha University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** In view of an improvement of the aerodynamic stability caused by aerodynamic lift at a high speed, an improved design method has been proposed of closing the bottom of front axle with an addition of the “front teeth” attachment device so as to achieve an excellent vehicle aerodynamic lift performance. Based on the accuracy of the algorithm verified by wind tunnel experiments, the optimal Latin hypercube method is used to design the sample points, with the Kriging proxy model adopted to construct the approximate model between the optimal design variables and the aerodynamic lift coefficient. Meanwhile, the multi-island Genetic Algorithm (Mga) is used for an optimization of the parameters of the automobile front tooth attachment. The results show that it is characterized with a high accuracy

收稿日期: 2021-04-18

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目 (2019JJ60063, 2019JJ60064); 湖南省教育厅科研基金资助重点项目 (18A270, 20A157); 湖南省重点研究计划基金资助项目 (2020NK2035)

作者简介: 张勇 (1979-), 男, 陕西汉中, 湖南工业大学副教授, 博士, 主要从事车辆工程方面的教学与研究, E-mail: 289714423@163.com

通信作者: 刘水长 (1981-), 女, 湖南株洲人, 湖南工业大学讲师, 博士, 主要研究方向为机电工程现代设计理论与方法, E-mail: liushuichang100@163.com

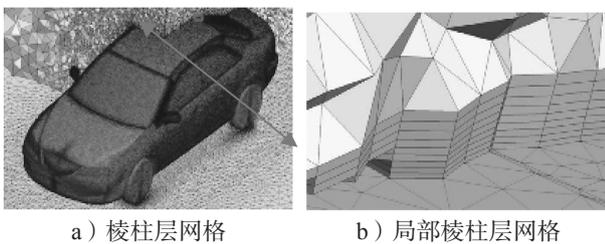
with the application of LBM to the calculation of vehicle aerodynamic lift; by closing the bottom near the front axle, the aerodynamic lift characteristics can be effectively improved, with the aerodynamic lift reduced by 36.4%; with a respective addition of 359.54 mm width and 27.46 mm of the height front teeth, the front axle lift coefficient  $C_{lf}$  is maintained at  $-0.0637$ , which meets the actual engineering requirements.

**Keywords:** vehicle aerodynamic lift; kriging proxy model; front teeth; optimization

## 1 研究背景

已有研究表明,气动力会随着汽车车速的平方项增大,故当汽车高速行驶时,迅速增加的气动升力会使得部分车型的抓地能力及稳定性能变差<sup>[1]</sup>,这一现象在赛车领域更为显著。在当前安全、可靠出行的汽车技术背景下,如何提高汽车的高速气动升力稳定性已不容忽视<sup>[2-4]</sup>。

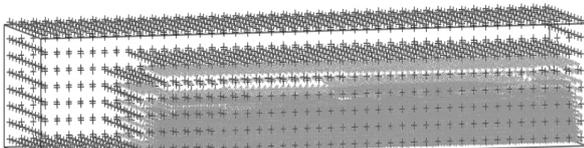
由于“地面效应”的存在<sup>[5]</sup>,导致汽车高速气动升力与其他运载工具有所不同<sup>[6]</sup>。同时,由于气动升力的敏感性<sup>[7]</sup>,导致其在数值仿真<sup>[8-12]</sup>、风洞实验<sup>[13-14]</sup>、优化理论<sup>[15]</sup>方面与气动阻力间的差异巨大。如在数值仿真中,S. Y. Cheng等<sup>[16]</sup>应用有限体积法(其网格模型如图1所示)和风洞试验法进行了对比研究,得出车辆的气动阻力误差很小,而气动升力误差相对较大的结论。



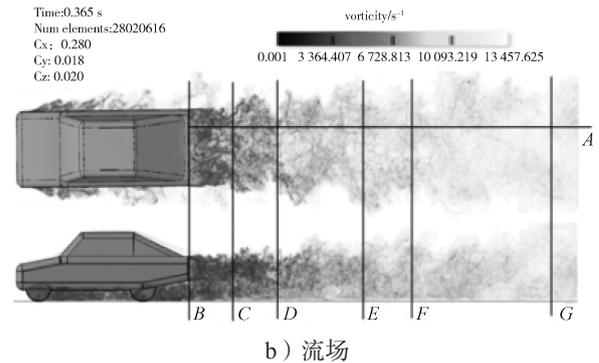
a) 棱柱层网格 b) 局部棱柱层网格  
图1 有限体积法网格模型

Fig. 1 Finite volume mesh model

近年来,随着计算流体力学领域的快速发展,格子波尔兹曼方法(lattice Boltzmann method, LBM)<sup>[17-18]</sup>获得了广泛应用。LBM采用介观粒子迁移和碰撞表征流体的宏观流动,避免了有限体积法的网格畸变和汽车车身附面层难以准确表征等计算误差,因而在汽车空气动力学领域得到较好的应用(如图2所示为LBM法的离散模型与流场)<sup>[19]</sup>。然而,因为该方法与大涡模拟相结合,求解计算时间的成本较大,所以制约了其在工程中的应用。



a) 离散模型



b) 流场

图2 LBM法离散模型与流场

Fig. 2 LBM discrete model with its flow field

同时,不同车型的气动升力优化控制,应根据其前、后两轴的升力大小,确定不同的优化目标。如赛车、跑车的优化目标为形成较大的前、后两轴负升力,以增强其抓地能力。而对于轴荷平衡后的乘用车,其情况较为复杂,若其总升力为正,为避免高速时出现发飘现象,应通过车身造型或附加装置来减小车身升力,并适当形成前负后正的前后轴升力分配;若总升力为负,则应避免不必要的轴荷,提高燃油的经济性,形成前轴升力相对趋负,并减小总的负升力的前后轴升力分配。对于自重较大的商用车,为降低其轴荷,应在优化后使得其升力为正。然而,关于这些方面的优化设计及其应用,如今尚鲜有报道。

为给汽车车身设计提供有益的参考,本文拟以某款轿车为研究对象,结合LBM粒子法、HD-2风洞实验、优化拉丁超立方设计方法(Optimal Latin hypercube design, Opt LHD)、Kriging代理模型、遗传算法和车身优化理论,建立一套高效的优化设计方法,并将其应用于某款轿车“前唇”附加装置的优化设计之中,以实现其优良的气动升力特性。

## 2 汽车模型介绍

风洞实验和数值仿真是汽车空气动力学研究的两种基本手段。受实验条件的限制,并考虑到研究需要,将本研究选用的某款轿车的实验模型分为简化模型与精细模型两种。图3所示为某款轿车按1:3缩

小后的几何模型主体尺寸(单位 mm)。图4所示为模拟轿车模型示意图,其中a、b图为简化模型,c、d图为原始模型,可见简化模型封闭了进气格栅,删除了底部发动机排气管等细节,该处理是为了便于加工实体模型。

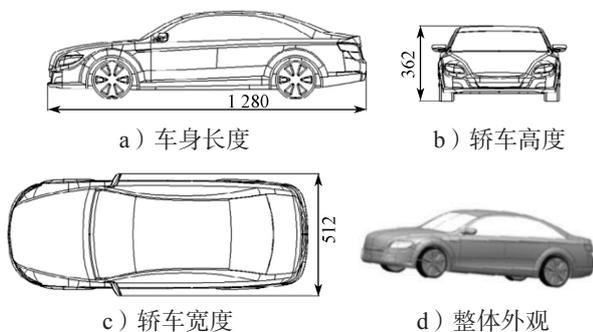


图3 某轿车模型外观及其主要尺寸

Fig. 3 Appearance and main dimensions of a car model

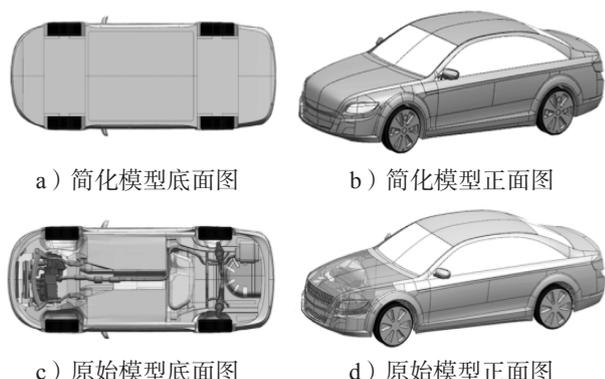


图4 轿车的简化模型和原始模型对比图

Fig. 4 A Comparison between the simplified model and the original model

### 3 LBM 数值仿真计算

#### 3.1 LBM 数值仿真方法

LBM 方法将流体视为大量介观迁移与碰撞的粒子微团,系统的宏观参数采用统计方法得到。统计时,设一个计算域内单粒子的分布函数为  $f(\mathbf{r}, \boldsymbol{\xi}, t)$ , 其中,  $\mathbf{r}(x, y, z)$  为空间位置矢量;  $\boldsymbol{\xi}(\xi_x, \xi_y, \xi_z)$  为分子速度矢量,  $t$  为时间;  $f(\mathbf{r}, \boldsymbol{\xi}, t)\Delta\boldsymbol{\xi}$  表示  $t$  时刻速度在  $[\boldsymbol{\xi}, \boldsymbol{\xi}+\Delta\boldsymbol{\xi}]$  间的分子数, 则密度数可表示为

$$n = \int f(\mathbf{r}, \boldsymbol{\xi}, t) d\boldsymbol{\xi}. \quad (1)$$

式中  $n$  为  $t$  时刻  $\mathbf{r}$  处单位体积内的分子数, 即密度数。设任意粒子在时间变量  $\Delta t$  内无碰撞, 则分子的位置矢量由  $\mathbf{r}$  变为  $\mathbf{r}+\mathbf{a}\Delta t$ , 而速度将由  $\boldsymbol{\xi}$  变为  $\boldsymbol{\xi}+\mathbf{a}\Delta t$ , (式中  $\mathbf{a}$  为加速度) 即在时间变量  $\Delta t$  内无碰撞。到  $t+\Delta t$  时, 原来  $t$  时刻在  $\Delta\mathbf{r}\Delta\boldsymbol{\xi}$  中气体分子  $f(\mathbf{r}, \boldsymbol{\xi}, t)\Delta\mathbf{r}\Delta\boldsymbol{\xi}$  将全部不增不减地转移到  $\mathbf{r}+\mathbf{a}\Delta t, \boldsymbol{\xi}+\mathbf{a}\Delta t$  的  $\Delta\mathbf{r}\Delta\boldsymbol{\xi}$  中, 则

此时有

$$f(\mathbf{r}+\mathbf{a}\Delta t, \boldsymbol{\xi}+\mathbf{a}\Delta t, t+\Delta t)\Delta\mathbf{r}\Delta\boldsymbol{\xi} = f(\mathbf{r}, \boldsymbol{\xi}, t)\Delta\mathbf{r}\Delta\boldsymbol{\xi}. \quad (2)$$

对式(2)左端进行 Taylor 展开, 两边同除以  $\Delta t$ , 并令  $\Delta t \rightarrow 0$ , 此时有

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \boldsymbol{\xi} \cdot \frac{\partial f}{\partial \mathbf{r}} + \mathbf{a} \cdot \frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{\xi}} = 0. \quad (3)$$

考虑碰撞变化量, 则式(3)改为

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \boldsymbol{\xi} \cdot \frac{\partial f}{\partial \mathbf{r}} + \mathbf{a} \cdot \frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{\xi}} = \left( \frac{\partial f}{\partial t} \right)_{\text{碰撞运动}}. \quad (4)$$

按照 1954 年 Bhatnagar、Gross 和 Krook 提出的 BGK 近似理论<sup>[20]</sup>, 经过系列推导, 可将新的粒子分布函数表示为如下 Boltzmann-BGK 方程:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \boldsymbol{\xi} \cdot \frac{\partial f}{\partial \mathbf{r}} + \mathbf{a} \cdot \frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{\xi}} = -\frac{1}{\tau_0} [f^{\text{eq}} - f]. \quad (5)$$

式中:  $\tau_0$  为松弛时间;  $f$  为一个计算域内单粒子的分布函数;  $f^{\text{eq}}$  为  $f$  的平衡态分布。

将式(5)进行速度离散、时间离散、空间离散处理。空间离散时, 按当前最先进的空间离散模型 D3Q27 展开<sup>[21]</sup>, 平衡态分布函数写成下式:

$$f_a^{\text{eq}} = \rho \omega_a \left[ 1 + \frac{e_a \cdot u}{c_s^2} + \frac{(e_a \cdot u)^2}{2c_s^4} - \frac{u^2}{2c_s^2} \right]. \quad (6)$$

式中:  $\rho$  为密度;  $\omega_a$  为权系数;  $e_a$  为离散速度;  $u$  为动力黏度;  $c_s$  为格子声速。

图5所示为 D3Q27 空间离散模型示意图。

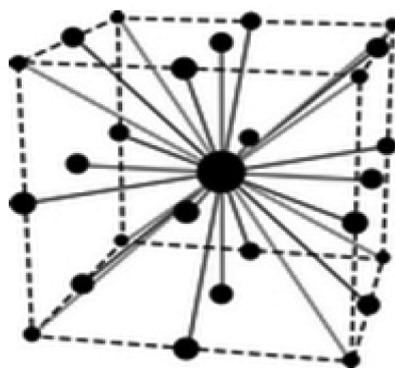


图5 D3Q27 空间离散模型示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the discrete model of D3Q27

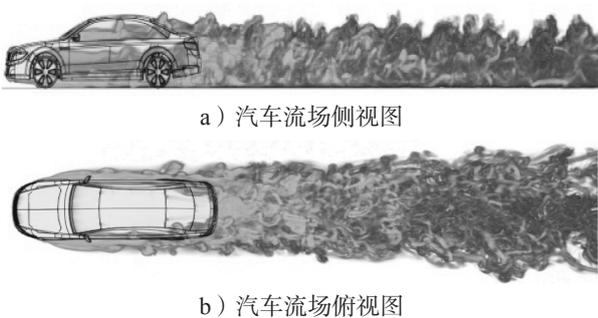
由图5可知, 该模型的空间离散是以插值节点粒子形式进行的, 因此在形状复杂的三维复杂曲面的汽车空气动力学仿真研究中, 具有很好的贴体性, 避免了有限体积法中体网格畸变产生的计算误差; 同时, 自适应的粒子密度分布可以精确地表征车身表面的附面层, 因而可以避免人为经验式的附面层划分引起的误差。

格子 LBM 的计算过程较为简单, 但是对于高雷

雷诺数的求解,其稳定性和精确度存在一定的局限性。若直接开展高雷诺数的模拟计算,不仅需要非常细小的粒子尺度,大规模增加粒子数量,而且对于计算机硬件的要求较高,还会导致计算耗费的时间翻番。为解决这一矛盾,将N-S方程中描述大尺度涡用的湍流模型,来描述小尺度运动的耗散作用,及其对大尺度运动的反馈作用,即提出了将 Boltzmann 方程与大涡模拟相结合的 LBM 方法,至于如何将 LBM 还原为 N-S 方程,详见文献 [22],该方法目前已具有很好的计算精度<sup>[23-24]</sup>。

对此,本文应用 LBM 方法开展汽车气动升力的仿真研究。首先应用图 4 中的简化模型开展汽车气动升力研究,并应用 HD-2 风洞试验验证该方法仿真结果的准确性。

一般汽车外流场可视为不可压缩定常流场,图 4 中的简化模型,在车轮静止下,入口速度为 30 m/s,常压出口,地面滑移速度为 30 m/s,以消除地面效应,其余为静止壁面。采用 8 颗 Xeon E7-4809-v4CPU, DDR4 内存 64 GB,硬盘接口类型为 SATA/SAS 的计算平台,耗时 113 h,所得 LBM 法轿车流场如图 6 所示,仿真实验测得轿车的气动阻力系数  $C_d$  为 0.264 2,升力系数  $C_l$  为 0.075 9。



a) 汽车流场侧视图

b) 汽车流场俯视图

图 6 LBM 法流场

Fig. 6 LBM flow field

### 3.2 风洞实验验证

将图 4 所示简化模型进行数控铣削加工,制作成如图 7 所示的 HD-2 风洞实验模型。实验验证时的边界层风洞为如图 8 所示的 HD-2 风洞。



图 7 轿车的风洞实验模型

Fig. 7 Mode for the wind tunnel experiment of the vehicle



图 8 HD-2 风洞

Fig. 8 HD-2 wind tunnel

图 8 所示 HD-2 风洞的高速段长、宽、高分别为 17.0, 3.0, 2.5 m, 实验风速为 0~58 m/s 连续可调。雷诺数约为  $1.3 \times 10^6$ , 阻塞比小于 2.7%。测力装置采用六分力浮框式应变式天平,测量精度为 0.2%,附面层采用抽吸法移除。

经过 7 次实验后,测得图 4 所示简化车模的平均  $C_d$  为 0.273 8,  $C_l$  为 0.073 8。将仿真结果与实验结果进行对比,可知轿车模型的阻力系数误差、升力系数误差分别为 3.50% 和 2.84%,这一结果说明,采用本方法求解汽车气动力具有较高的准确性。

### 3.3 原始车模气动升力特性

应用验证后的 LBM 方法和仿真方案,研究如图 4 所示的原始轿车模型的气动升力特性。仿真方案与前面的相同,入口速度为 30 m/s,同时车轮设置为旋转工况,转动角速度为 366.8 rad/s (车轮直径为 163.5 mm),结合前后轴分解方法<sup>[25]</sup>,可得轿车的气动阻力系数  $C_d$  为 0.279 2,升力系数  $C_l$  为 0.084 5,其中前轴升力系数  $C_{lf}$  为 0.039 2,后轴升力系数  $C_{lr}$  为 0.045 3。

由上述计算结果可知,该车总升力为向上的正升力,其前后两轴亦为向上的正升力,这对汽车高速行驶时的行驶操纵稳定性是不利的,有必要通过改变车身造型或添加附加装置来进一步优化其气动升力特性。由于该车属于两轮轿车,前轮为转向轮,根据前言中提到的优化目标,该车型应减小其气动升力,尤其是通过优化,形成前轴向下的负升力,以增强轿车转向时的抓地能力,进而提高汽车高速行驶时的安全稳定性能。

## 4 车辆底部改进的气动升力特性分析

在汽车车身设计后期,其造型已定型,不宜进行车身曲面的修改,考虑到工程的经济性与可行性,一般采取增加附加气动装置的方法来实现对气动力的控制,本研究选择将汽车前轴附近的底部区域进行封

闭, 封闭后的模型如图 9 所示。

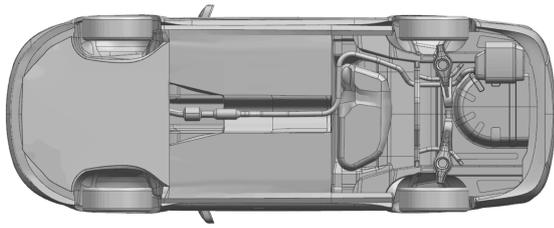


图 9 封闭汽车底部后的模型示意图

Fig. 9 Schematic diagram after the closing of the bottom of the car

应用与上节相同的数值仿真方案, 经计算, 可得模型的车身上下表面压力云图, 并将其与未封闭底部区域的轿车模型计算所得压力云图进行对比, 结果如图 10 所示。

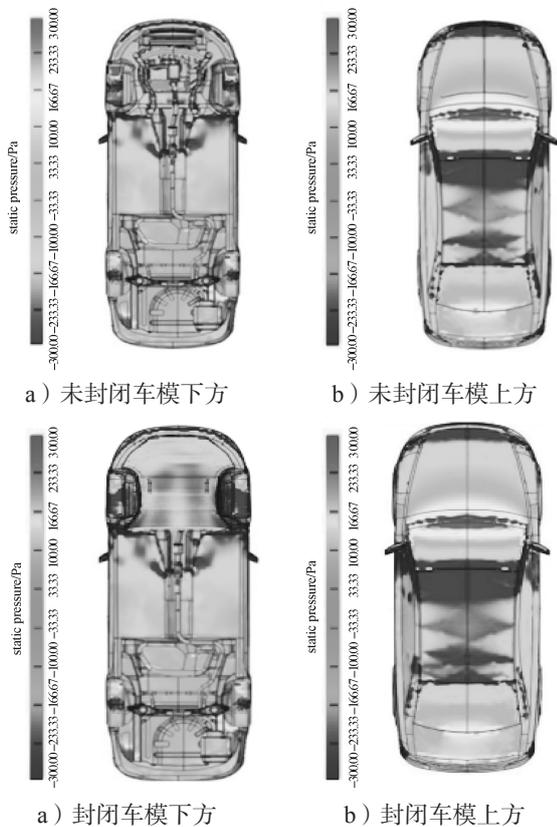


图 10 车身上下压力云图对比

Fig. 10 Comparison of body pressure nephograms

由图 10 可看出, 将汽车前轴附近的底部区域封闭后, 汽车底部前端区域的表面压力趋向负压的面积明显大于未封闭状态的, 而上表面的压力未有明显的变化。这是由于车身底部封闭后, 前轴附近区域的气流流量减少, 导致上下表面压力差增大, 最终导致前轴升力趋负。

监测轿车模型的气动力, 可以得到封闭后其气动阻力系数  $C_d$  为 0.267 2, 升力系数  $C_l$  为 0.053 5, 其中前轴升力系数  $C_{lf}$  为 -0.036 9, 后轴升力系数  $C_{lr}$  为 0.090 4。

这一结果与压力分布分析结果一致。表明封闭汽车底部后, 其气动升力系数降低了约 36.7%, 气动阻力系数降低了约 4.3%, 形成了前轴较小的负升力和后轴正升力, 这有利于提高前轮转向轮地面附着力, 也在一定程度上降低了后轴载荷, 改善了车身的气动升力特性。

## 5 附加装置优化设计

### 5.1 前齿附加装置设计

由底部改进的气动升力特性检测结果可知, 封闭了车身底部, 可改善汽车的气动升力特性, 使得总的气动升力系数和阻力系数降低, 前轴形成很小的负升力系数、后轴形成较小的正升力系数。但这是车身在水平路面行驶时的状态, 而在实际车辆高速行驶中, 受路面高低起伏等因素的影响, 会引起车身俯仰等姿态的变化。诸多研究表明, 车身姿态变化引起的气动升力系数和阻力系数均接近似线性急剧增长, 其原有稳定的气动升力特性将迅速恶化, 表现出地面附着力降低, 严重时会出现甩尾和侧倾趋势增强的现象, 因而会增加驾驶员的心理恐慌和压力, 提高误判、误操作的机率, 从而成为高速行驶时产生交通事故的重要诱因。对此, 为防止车身姿态发生俯仰时的车头上抬, 本研究设计了抑制车头抬起时升力增大的前齿附加装置 (简称前齿), 如图 11 所示。

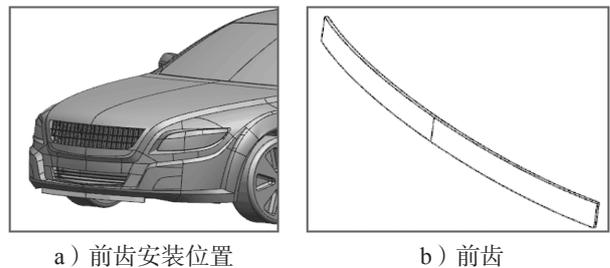


图 11 前齿附加装置示意图

Fig. 11 Schematic diagram with an additional front teeth

如图 11 所示前齿附加装置结构, 前齿紧贴汽车前唇底部边缘安装, 并沿纵对称面对称布置。采用橡胶材料制作, 在受到硬质障碍时, 可挤压变形, 因而不会降低车辆的通过性能。而在车辆高速行驶加速状态时, 根据前文所述前轴实现负升力的作用机理, 前齿可有效减小进入汽车底部的气流流量, 以实现更负的前轴气动升力, 让前轮贴紧地面, 抑制车头的上抬趋势。

### 5.2 前齿优化数学模型

安装前齿的目的是通过增大车头底部的迎风面积, 减小汽车底部的气流流量, 最终实现更负的前轴升力。为实现这一目标, 需要在车头有限的空间内,

通过优化计算得出前齿的最优结构尺寸。

如图 12 所示, 前齿附加装置具有弧长  $L$  和宽度  $H$  两个特征参数, 故需要对这 2 个参数进行寻优。

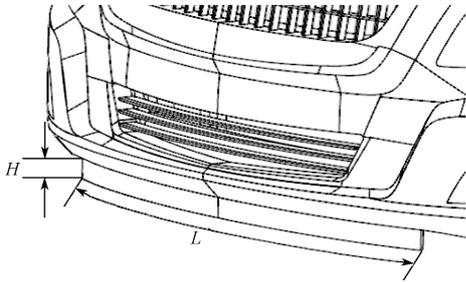


图 12 前齿优化参数示意图

Fig. 12 Schematic diagram of front teeth optimization parameters

前齿附加装置的结构不同, 导致其流场不同, 其所能达到的效果也不同。 $L$  和  $H$  两个参数的取值不同, 将引起车身的气动阻力系数、升力系数、前后轴气动升力系数等不同。因此, 需要通过控制弧长  $L$  和宽度  $H$ , 使其在有限的空间范围内, 获得前轴升力系数  $C_{lf}$  最小, 即最大负升力, 并最终具有工程安装可行性。对此, 建立如下工程优化问题的数学模型。

优化目标:  $C_{lmin}$ ;

优化变量:  $L$ 、 $H$ ;

约束条件:  $0 \text{ mm} < L < 540 \text{ mm}$  (区间为汽车前唇边缘轮廓弧长);

$0 \text{ mm} < H < 45 \text{ mm}$  (最大宽度为汽车模型前唇下到地面间的距离)。

### 5.3 试验设计与近似模型

由于需要优化的变量较少, 为保证设计样本的均匀性, 使得响应更为精准, 可选取优化拉丁超立方设计方法进行样本点的设计。为保证试验样本点均匀分布在约束变化的空间上, 同时为减少计算量, 综合考虑计算精确性和计算时间成本, 基于优化拉丁超立方设计方法, 共设计了 9 组样本点, 同时建立各样本点的几何数字模型, 对图 11 所示的装有前齿的轿车精细模型, 在车轮旋转条件下进行仿真试验, 相关计算边界条件及设置的参数与前文相同。应用 LBM 进行仿真计算, 可获得各样本点的目标函数值, 整理如表 1 所示。

由于 LBM 方法的计算精度较高, 而计算效率较低, 表 1 中所述变量不可能靠近或找到最优解, 对此, 通过构建近似模型的方法逼近最优解。近似模型的构建方法有多种, 其中克里格方法 (Kriging) 是一种空间局部插值的近似模型构建方法, 可在有限区域内对变量进行无偏差的最优估计。因本文的研究重点是气动升力, 因此只对表 1 中的  $L$ 、 $H$  变量引起的前

轴气动升力系数  $C_{lf}$  的变化来构建 Kriging 近似模型, 并用相关性系数来评价近似模型的精度。

表 1 试验设计样本点的目标函数值

样本点	变量					
	$L$	$H$	$C_d$	$C_l$	$C_{lf}$	$C_{lr}$
1	418	5	0.275 2	0.035 9	-0.037 2	0.053 1
2	234	10	0.278 6	-0.041 5	-0.054 7	0.013 2
3	50	15	0.269 4	0.049 9	-0.039 2	0.089 1
4	479	20	0.301 0	-0.022 8	-0.063 2	0.040 4
5	295	25	0.282 8	-0.029 7	-0.058 8	0.029 1
6	111	30	0.276 2	0.012 7	-0.021 8	0.034 5
7	540	35	0.305 4	-0.042 2	-0.030 6	-0.011 6
8	356	40	0.295 5	-0.062 5	-0.057 5	-0.005 0
9	173	45	0.298 3	-0.015 7	-0.025 7	0.010 0

图 13 所示为  $C_{lf}$  与  $L$ 、 $H$  的相关性系数图。

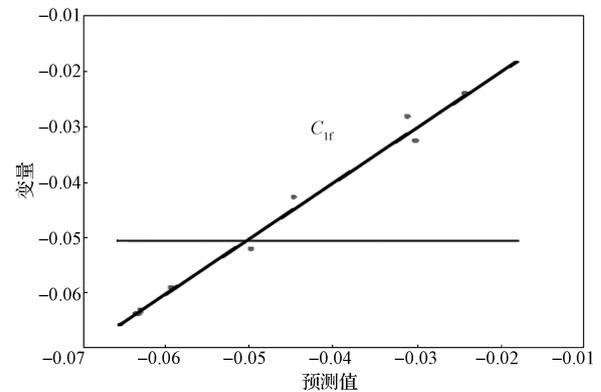


图 13  $C_{lf}$  与变量间的相关性系数曲线

Fig. 13 Correlation coefficient curve of  $C_{lf}$  with the variables

由图 13 可知, 表 1 中的样本均在近似模型曲线附近, 经计算, 可得误差分析函数的  $R^2$  为 0.975, 这一结果表明图 13 中的 Kriging 近似模型曲线具有较高的可信度。

图 14 所示为  $C_{lf}$  与  $L$ 、 $H$  的主效应图, 由图可知,  $L$  和  $H$  的变换均能引起  $C_{lf}$  的变化, 且存在极小值, 因而可获得最优解。

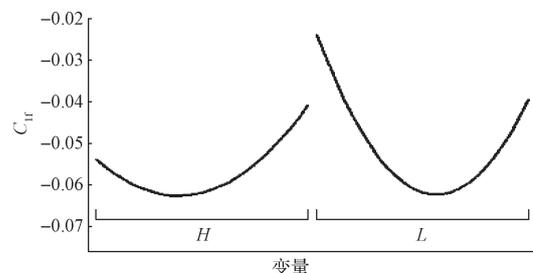


图 14  $C_{lf}$  与变量间的主效应图

Fig. 14 Main effect diagram for  $C_{lf}$  with the variables

### 5.4 优化算法与结果分析验证

获得最负的前轴升力系数, 是一个单目标双变量的寻优问题, 根据对图 12 和 13 的分析, 为增加样

本的多多样性,防止过早收敛,基于 Isight 算法,采用多岛遗传算法进行优化计算,计算迭代 5 000 步,最终可得最优  $L$  值和  $H$  值,分别为 359.54 mm 和 27.46 mm,此时,前轴最负的气动升力系数  $C_{lr}$  为  $-0.0636$ 。

考虑到优化结果的工程可行性,对  $L$  和  $H$  在毫米级上取整,则  $L$  为 360 mm,  $H$  为 27 mm。按此尺寸,重新对前齿附加装置建立几何数字模型,并应用 LBM 法进行仿真计算,以验证优化方法的可行性和结果的可靠性。

计算的边界条件、参数设置仿真方案等与前文所设置的相同。经计算,最终可以得到气动阻力系数  $C_d$  为 0.305 3,升力系数  $C_l$  为  $-0.0826$ ,前轴升力系数  $C_{lr}$  为  $-0.0637$ ,后轴升力系数  $C_{lr}$  为  $-0.0189$ ,对比该  $C_{lr}$  值与表 1 中的  $C_{lr}$  目标值,可知获得了最负的前轴升力。

图 15 所示为安装有前齿附加装置的车身上下表面的压力分布云图(前齿为局部放大图中黑色结构)。

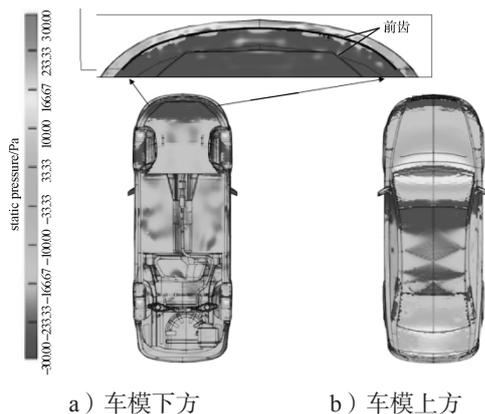


图 15 安装前齿的车身表面压力云图

Fig. 15 Front tooth pressure nephogram

对比图 10 和 15 可知,安装前齿后的车身底部前端代表负压区域的面积(见图 15),相比封闭汽车底部(见图 10)处理的负压区域面积更大,且颜色更加深,表明车身上下表面的压差更大,进而导致前轴负升力更加趋向负值。这一结果证明了上述优化方法的可靠性,同时也说明安装前齿附加装置后,对前轴形成前轴负升力的有效性。

## 6 结论

本文以某款轿车为研究对象,结合 LBM 粒子法、HD-2 风洞实验、Opt LHD、Kriging 代理模型、遗传算法和车身优化理论等,建立了一套优化设计方法,并以某款轿车“前唇”附加装置的优化设计为例,经风洞实验验证了设计的有效性,可得出如下结论:

1) 应用 LBM 求解汽车气动升力,具有较高的

计算精度。应用该方法对原始模型进行数值仿真,并以风洞实验和原始车模的气动升力特性验证了仿真结果,确认有必要通过改变车身造型或添加附加装置来进一步优化其气动升力特性。

2) 为提高汽车高速行驶时的稳定性,将轿车前轴附近的底部封闭,这一改进可有效改善气动升力特性。监测结果表明,这一改进设计可有效降低轿车的气动升力,约可降低 36.7%。

3) 提出对前齿增设附加装置,并采用优化拉丁超立方、Kriging 近似模型和多岛遗传算法等优化方法,以提高优化效率,并获得最优解。对目标款轿车,在增设前齿弧长为 360 mm、齿高 27 mm 附加装置时,可获得最大的前轴负升力系数,为  $-0.0637$ ,这一结果有利于改善汽车的高速气动升力特性。

以上结论,可在轻量化车身设计背景下,给汽车车身设计提供一定的借鉴与参考。

## 参考文献:

- [1] JOSEPH K, GARCIA D, SLUDER R. Aerodynamics of Race Car liftoff[J/OL]. SAE Technical Papers, 2004. <http://www.doc88.com/p-9919450498695.html>.
- [2] 谷正气. 汽车空气动力学[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005: 3-11.  
GU Zhengqi. Automotive Aerodynamics[M]. Beijing: People's Communications Press, 2005: 3-11.
- [3] 邱峰, 陈士安, 何仁, 等. 空气阻力及升力对高速车辆操纵稳定性的影响[J]. 拖拉机与农用运输车, 2011, 38(1): 20-24.  
QIU Feng, CHEN Shi'an, HE Ren, et al. Influences of Aerodynamic Drag and Lift on Handling Stability of High Speed Vehicle[J]. Tractor & Farm Transporter, 2011, 38(1): 20-24.
- [4] 张树强, 张乐. 空气力及空气力矩对汽车操纵稳定性的影响[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2002, 25(5): 719-723.  
ZHANG Shuqiang, ZHANG Le. Influence of Air Strength and Air Torque on the Vehicle Driving Stability[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2002, 25(5): 719-723.
- [5] 张英朝, 詹大鹏, 赵婧, 等. 汽车风洞地面效应模拟系统影响的研究[J]. 汽车工程, 2016, 38(12): 1434-1439.  
ZHANG Yingchao, ZHAN Dapeng, ZHAO Jing, et al. A Study on the Influence of Ground Effect Simulation System in Automotive Wind Tunnel[J]. Automotive Engineering, 2016, 38(12): 1434-1439.
- [6] COOPER K R, BERTENYI T, DUTIL G, et al. The

- Aerodynamic Performance of Automotive Underbody Diffusers[J]. SAE Transactions, 1998, 107: 150-179.
- [7] HETHERINGTON B, SIMS-WILLIAMS D B. Support Strut Interference Effects on Passenger and Racing Car Wind Tunnel Models[J/OL]. SAE Technical Papers, 2006. <http://www.doc88.com/p-1117283507103.html>.
- [8] 张勇, 谷正气, 刘水长. 车身姿势对风洞试验气动升力测量影响研究[J]. 汽车工程, 2015, 37(3): 295-299.  
ZHANG Yong, GU Zhengqi, LIU Shuichang. A Study on the Effects of Car Body Posture on the Measurement of Aerodynamic Lift in Wind Tunnel Test[J]. Automotive Engineering, 2015, 37(3): 295-299.
- [9] 熊超强, 臧孟炎, 范秦寅. 低阻力汽车外流场的数值模拟及其误差分析[J]. 汽车工程, 2012, 34(1): 36-39, 45.  
XIONG Chaoqiang, ZANG Mengyan, FAN Qinyin. Numerical Simulation of External Flow Field Around Low Drag Car and Its Error Analysis[J]. Automotive Engineering, 2012, 34(1): 36-39, 45.
- [10] TSUBOKURA M, NAKASHIMA T, KITO H, et al. Development of an Unsteady Aerodynamic Simulator Using Large-Eddy Simulation Based on High-Performance Computing Technique[J]. SAE International Journal of Passenger Cars - Mechanical Systems, 2009, 2(1): 168-178.
- [11] DESAI S S, LO C-M B, GEORGE A R. A Computational Study of Idealized Bluff Bodies, Wheels, and Vortex Structures in Ground Effect[J/OL]. SAE Technical Papers, 2008. <http://www.doc88.com/p-6761965313986.html>.
- [12] 谷正气, 赵万东, 张勇, 等. 网格质量评价指标对汽车外流场模拟结果影响的研究[J]. 汽车工程, 2015, 37(11): 1265-1269.  
GU Zhengqi, ZHAO Wandong, ZHANG Yong, et al. A Research on the Effects of Mesh Quality Evaluation Criteria on the Results of Vehicle External Flow Field Simulation[J]. Automotive Engineering, 2015, 37(11): 1265-1269.
- [13] SINIŠA K, LARS D. Flow Around a Simplified Car, Part1: Large Eddy Simulation[J]. Journal of Fluids Engineering, 2005, 127(5): 907-918.
- [14] HONEYCUTT D B, UDDIN M. Closed Wheel Race Vehicle Aerodynamic Lift-Off[J]. SAE International Journal of Passenger Cars-Mechanical Systems, 2017, 10(2): 573-579.
- [15] DZIJAŃ I, PASIĆ A, BULJAC A, et al. Aerodynamic Forces Acting on a Race Car for Various Ground Clearances and Rake Angles[J]. Journal of Applied Fluid Mechanics, 2019, 12(2): 361-368.
- [16] CHENG S Y, TSUBOKURA M, OKADA Y, et al. Aerodynamic Stability of Road Vehicles in Dynamic Pitching Motion[J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 2013, 122: 146-156.
- [17] 何雅玲, 王勇, 李庆. 格子 Boltzmann 方法的理论及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 4-8.  
HE Yaling, WANG Yong, LI Qing. Theory and Applications of Lattice Boltzmann Method[M]. Beijing: Science Press, 2009: 4-8.
- [18] AIDUN C K, CLAUSEN J R. Lattice-Boltzmann Method for Complex Flows[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2010, 42: 439-472.
- [19] ZHANG Yong, GU Zhengqi, LIU Shuichang. Transient Simulation Research on Automobile Aerodynamic Lift Based on LBM Method[J]. Mechanika, 2017, 23(6): 845-851.
- [20] 应纯同. 气体输运理论及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 1990: 251-258.  
YING Chuntong. Transport Theory and Applications of Gases[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1990: 251-258.
- [21] SUGA K, KUWATA Y, TAKASHIMA K, et al. A D3Q27 Multiple-Relaxation-Time Lattice Boltzmann Method for Turbulent Flows[J]. Computers & Mathematics with Applications, 2015, 69(6): 518-529.
- [22] 杜睿. 不可压多松弛格子 Boltzmann 方法的研究及其应用[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.  
DU Rui. Research on Incompressible Multi-Relaxation-Time Lattice Boltzmann Method and Its Application[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007.
- [23] 郭照立, 郑楚光. 格子 Boltzmann 方法的原理及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 9-14.  
GUO Zhaoli, ZHENG Chuguang. Theory and Applications of Lattice Boltzmann Method[M]. Beijing: Science Press, 2009: 9-14.
- [24] GINZBURG Irina, VERHAEGHE Frederik, D'HUMIERES Dominique. Two-Relaxation-Time Lattice Boltzmann Scheme: About Parametrization, Velocity, Pressure and Mixed Boundary Conditions[J]. Communications in Computational Physics, 2008, 3(2): 427-478.
- [25] 张勇, 谷正气, 刘水长, 等. 基于风洞试验与 CFD 分析的汽车前后轴气动升力计算的研究[J]. 汽车工程, 2017, 39(3): 275-280.  
ZHANG Yong, GU Zhengqi, LIU Shuichang, et al. A Research on Vehicle Aerodynamic Lift Calculation of Front and Rear Axles Based on Wind Tunnel Test and CFD Analysis[J]. Automotive Engineering, 2017, 39(3): 275-280.

(责任编辑: 廖友媛)