

文章编号: 1000-8055(2010)05-1031-05

汽车理想气动形体数字化模型构建及气动性能试验

何忆斌^{1,2}, 谷正气², 李伟平², 江 涛²

(1. 湖南涉外经济学院 机械工程学部, 长沙 410205;

2. 湖南大学 机械与运载工程学院 汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 长沙 410082)

摘 要: 以最小气动升力和最小俯仰力矩作为力学约束条件构建了一条理想气动形体的设计特征上凸曲线——“升力面”在汽车纵对称平面上的投影线; 以结构布置和乘坐舒适性作为几何约束条件, 进而构建了一个具有较低气动阻力的理想形体. 通过对该形体的风洞试验验证, 其阻力系数为 0.145, 升力系数为 0.0486, 俯仰力矩系数为 -0.0405. 证明该方法具有一定的准确性, 可用于汽车车身前期的气动优化.

关 键 词: 理想气动形体; 风洞试验; 气动阻力; 气动升力; 俯仰力矩

中图分类号: U461

文献标识码: A

Design of aerodynamic optimization shape digital model for car and it's wind tunnel test

HE Yibin^{1,2}, GU Zhengqi², LI Weiping², JIANG Tao²

(1. College of Mechanic Engineering,

Hunan International Economics University, Changsha 410205, China;

2. Key State Laboratory of Advanced Technology and Manufacture for Vehicle Body,
College of Mechanical and Vehicle Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Taking the least aerodynamic lift and longitudinal moment as restriction conditions, a protruding curve of aerodynamic optimization shape, namely, a projection curve of 'lifting section' on the car longitudinal symmetry section was designed; and taking machinery setting and living comfort as geometry restriction condition, an aerodynamic optimization shape with less aerodynamic drag was further created. The wind tunnel test of the shape validates the finite veracity of this method. The method can be used for forepart aerodynamic optimization of car; the result can greatly save wind tunnel test time and the outlay of aerodynamic optimization styling for car.

Key words: aerodynamic optimization shape; wind tunnel test; aerodynamic drag; aerodynamic lift; pitching moment

从 20 世纪初叶开始, 汽车工程界一直致力于寻找一种在接近地面的状况下, 满足机械工程学、人体工程学、总体结构布置符合汽车外形尺寸要求、操纵稳定性和其他安全法规等各方面要求的

同时, 具有最小气动阻力的基本理想气动形体^[1-4]. 其基本思路是: 从一个总体尺寸和体积与所设计的汽车基本类似的理想低阻形体出发, 从总体的角度逐渐向实用车型逼近, 以满足人机工

收稿日期: 2009-07-25; 修订日期: 2009-12-03

基金项目: 国家高技术研究发展计划(2007AA04Z122); 第二批湖南省大学生研究性学习与创新性实验计划项目; 湖南省高等学校科学研究项目(09C592)

作者简介: 何忆斌(1967-), 男, 湖南长沙人, 副教授, 博士, 主要从事汽车空气动力学方向的研究.

程学、工艺学、美学造型及安全法规等方面的要求,使整车各项性能达到最优^[5-7].

汽车工程界构建理想气动形体模型最常用的方法是通过大量的模型风洞试验来获得^[8-10].但这种方法,周期长,耗资较大.本文利用气动阻力,气动升力,俯仰力矩作为约束条件,通过空气动力学优化方法来创建一个汽车理想气动数字化模型并进行风洞试验验证.

1 理想气动形体构建

1.1 理想气动形体构建理论

在车身设计的初期,最原始的设计曲线只是一条上凸的曲线,然后根据乘坐空间、总布置要求等,设计出车身外形轮廓.

汽车的高速运动可以视为近地面空气的绕流运动,在探寻车身理想化造型的过程中,可以参考飞机翼型截面设计的理论——细长体切片理论,进而汽车车身被抽象成为一个“升力面”,即以车身各横截面形心的连线为母线,亦即弯度线,以各截面对应的最大车宽为宽度,覆盖整个车长的一个曲面^[11].升力面在汽车纵对称平面上的投影与该车的弯度线重合.该弯度线就是构造理想气动形体的一条设计特征上凸曲线,它就是升力面在汽车纵对称平面上的投影线,这条线也就是类似于普朗特提出的翼型升力线.通过对升力面的气动优化,将获得一个具有最小气动升力的理想气动形体.

升力面的参考坐标系如图 1 所示,其中的点划线为形体的弯度线,即形体所有横截面形心的连线.弯度线的负切角 φ 是“局部迎角”,形体任一横截面的形心到 x 轴所示的地面的距离函数 $h(x)$ 是弯度线方程.

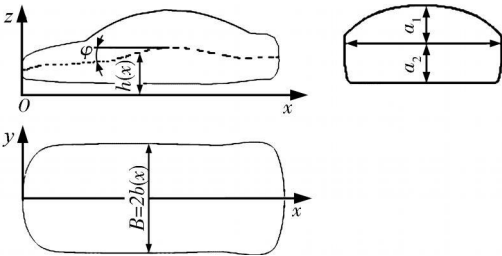


图 1 升力面的参考坐标系

Fig. 1 Lift section reference coordinates

弯度线方程

$$h(x) = h_0 - \int_0^x \frac{1}{2b(x)} \int_0^x \Delta C_{z0}(x) dx \quad (1)$$

其中 h_0 是积分常数,即形体最前端 $x = 0$ 处的 h 值,即形体离地高度.

从式(1)可以看出,只要函数 $\Delta C_{z0}(x)$ 和 $b(x)$ 确定,汽车理想气动形体的弯度线即可确定,也就是汽车理想气动形体沿形体纵对称面的变化趋势就确定了.

1.2 $b(x)$, $\Delta C_{z0}(x)$ 和 $a(x)$

对于具有常规机械布置的轿车,其俯视轮廓接近为一个长方形.可以采取一些能满足常规机械布置又满足乘坐舒适性要求的俯视外廓线 $b(x)$,该长方形外形尺寸为 $1.85\text{m} \times 4.8\text{m}$,在四个直角处和四边按照气动阻力优化取适当的二次曲线过渡.

理想车身造型应该满足以下理想的力学约束条件:①该车身体所受的合升力为零,即在汽车提高纵向行使稳定性的同时,可以减少或者避免诱导阻力的存在;②该理想形体所受的俯仰合力矩理想值为零^[4]; $\Delta C_{z0}(x)$ 满足形体上的合升力为零,即

$$F_z = q_\infty \int_0^L \int_{-b}^b \Delta C_z dy dx = \frac{q_\infty \pi}{4} \cdot \int_0^L 2b \Delta C_{z0} dx = 0 \quad (2)$$

$q_\infty = 0.5 \rho V_\infty^2$, 为汽车来流动压.

亦即

$$\int_0^L b(x) \Delta C_{z0}(x) dx = 0 \quad (2a)$$

整车的合俯仰力矩 $\sum M_y$ 为

$$\sum M_y = \frac{1}{2\pi} \int_0^L \Delta C_{z0} b x dx + C_d S h_g \quad (3)$$

$\Delta C_{z0}(x)$ 也必须满足理想气动形体所受的俯仰合力矩 $\sum M_y$ 的理想值为零(约束条件②),即

$$\sum M_y = \frac{1}{2\pi} \int_0^L \Delta C_{z0} b x dx + C_d S h_g = 0 \quad (3b)$$

其中 C_d 为形体的设计阻力系数,给定较小的期望值 $0.12 \sim 0.24$; S 为正投影面积,可以比照典型轿车的投影面积计算,即按 $0.81 \times \text{车宽} \times \text{车高}$,一般取值为 $1.85 \sim 2.4\text{m}^2$; h_g 为形体风压中心到地面的高度,可以近似取为 $h_g = h_{\text{max}}(x)$.

考虑到在接近地面条件下带弯度的流线体具有最小的形状阻力和形体的纵、横截面的轮廓形状及横截面面积均沿纵向(x 向)平缓渐变(减少形状阻力).

形体截面高度 $a = a_1 + a_2$, 沿纵向的变化规律取类似于 NACA(National Advisory Committee for Aeronautics, 美国航空航天局) 曲线的函数, 表示为

$$a(x) = C_0(C_1x^{1/2} - C_2x - C_3x^2 + C_4x^3 - C_5x^5)$$

其中系数 $C_i \geq 0$, 改变这些系数可以改变可以使得理想气动形体符合车身的相关要求.

2 理想气动形体数字化模型构建

2.1 理想气动形体参数设定

本文理想气动形体设计中取弯度为 $i = 7.8\%$ (理想形体纵剖面曲线离弦线的最大距离与弦长度的比值). 设计风阻系数 $C_d = 0.14$, 参考面积即汽车车身的迎风面积是 $S = 1.9\text{ m}^2$, $h_{\max} = 0.85\text{ m}$. 通过计算确定了满足所提供弯度的适当的系数及车身纵对称面升力系数函数 $\Delta C_{z0}(x)$ 的曲线, 计算确定了弯度线($h(x)$), 在已给定的车身横截面的曲线($a(x)$) 和车身体俯视图边界($b(x)$) 的变化规律的前提下, 就可以确定理想气动形体数字化模型.

2.2 形体构建

具体构建过程如下: 参见图 2 理想气动形体外形轮廓: 首先按照前述的力学约束条件求得理想气动形体的弯度线方程 $h(x)$, 然后根据几何约束条件和气动优化原理决定理想气动形体的横截面轮廓控制方程——拟 NACA 函数 $a(x)$, 为了获得不亚于常规轿车的居住性和机件布置空间, 形体横截面的外廓呈较接近四边形的圆滑封闭曲线, 其宽度沿 x 方向按 $b(x)$ 变化. 至此, 理想气动形体在 xy , yz , xz 平面的外形轮廓已全部确定, 进而在三维 CAD(computer aided design) 软件环境下(本文使用 Pro/E Wild—fire3. 0

CAD 软件), 将形体横截面封闭轮廓($a(x)$) (扫掠截面) 沿 x 方向按照 $h(x)$ (扫掠轨迹) 渐变扫掠, 其宽度由 $b(x)$ 控制, 如图 2 理想气动形体数字化模型构建过程示意图所示, 就可以得到如图 3 所示的理想气动形体数字化模型^[12].

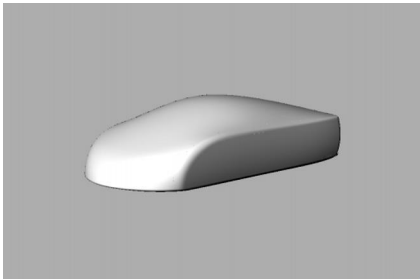


图3 理想气动形体数字化模型

Fig. 3 Aerodynamic optimization shape digital model

3 理想气动形体风洞试验

3.1 HD-2 风洞

湖南大学 HD-2 风洞建于 2004 年 10 月并投入运行, 风洞试验室占地 2000 m^2 , 建筑面积 3000 m^2 . 该风洞气动轮廓全长 53 m 、宽 18 m , 为低速、单回流、串列双试验段的边界层风洞.

汽车试验段(高速试验段) 长 17 m , 模型试验区横截面宽 3 m 、高 2.5 m , 试验段风速 $0 \sim 65\text{ m/s}$ 连续可调, 速度不均匀性小于 1% 、方向场不均匀性小于等于 0.5° 、紊流度小于等于 0.2% 、高速试验段轴向静压梯度为 $0.00011/\text{m}$. 在模型前部有边界层抽吸区域.

3.2 理想气动形体模型及其在风洞中的安装

理想模型风洞试验在 HD-2 风洞中进行, 理想试验模型缩尺比例为 $1:3$, 试验模型是根据 CAD 数据模型通过数控机床加工而成. 模型由轮轴距调节装置支杆安装在气动六分力天平上, 模型不能与风洞的地板接触, 其距离控制在 $2 \sim 4\text{ mm}$ 之间. 为了最大限度地控制模型底部边界层的厚度, 抽吸地板安装在距天平中心 1.5 m 处, 其抽吸风量可以在主流流量的 $0 \sim 10\%$ 之内进行调节, 并以此实现对不同来流速度下模型底部边界层厚度的控制. 模型气动六分力由浮框式六分量应变天平测量, 天平通过轮轴距调节装置的 4 根支杆与模型实现力的传递. 天平精度优于 $0.2\% \text{ FS}$; 天平准度优于 $0.3\% \text{ FS}$. 图 4 为汽车理想气动形体在 HD-2 风洞中的安装图.

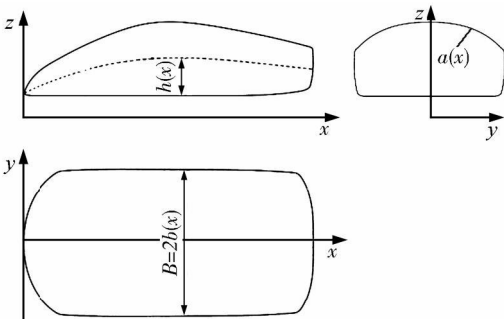


图2 理想气动形体外形轮廓

Fig. 2 Aerodynamic optimization shape outline



图 4 形体在风洞中的安装

Fig. 4 Aerodynamic optimization shape fixed in wind tunnel

3.3 试验结果与分析

3.3.1 试验雷诺数对气动性能的影响

试验风速在 5~ 43 m/s 之间, 每次试验为消除数据采集的偶然误差带来的负面影响, 均作 3 次重复性试验(考虑了地面效应的作用).

由图 5 可见, 理想气动形体模型的气动力和力矩系数在来流速度大于 20 m/s 以后均趋于稳定.

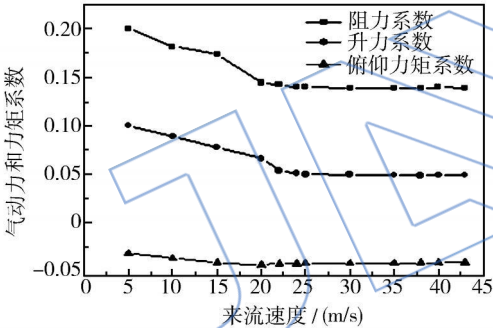


图 5 模型气动力和力矩系数与来流速度的关系

Fig.5 Curves of coefficient of aerodynamic force and moment of model and velocity of flow

3.3.2 地面效应对气动性能的影响

为了研究地板边界层造成的地面效应问题, 本试验采用了均匀抽吸地板将地板边界层吸除, 在有、无边界层的条件下分别对模型的气动力进行了研究.

由图 6~ 图 8 比较可以发现, 理想气动形体的阻力系数在有地效时试验数据偏大, 即实际物理环境中, 汽车的阻力系数大于风洞试验中的测量数据; 升力系数则相反, 有地面效应时试验数据偏小; 俯仰力矩在有地面效应时大于没有地面效应时的测量数据. 从图 6~ 图 8 还可以看出, 理想气动形体的升力系数与俯仰力矩系数很小, 在来流速度大于 20 m/s 后, 基本趋于稳定, 形体的阻

力系数为 0.145, 形体的升力系数为 0.0486, 俯仰力矩系数为 - 0.0405, 这也证明了构建理想气动形体理论的正确性.

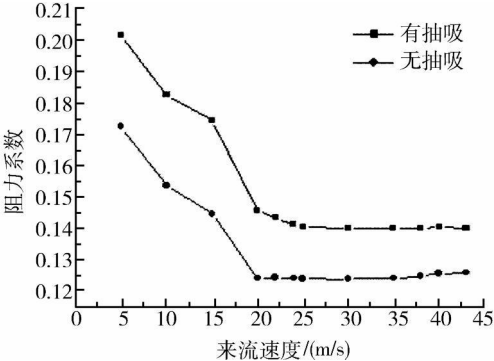


图 6 理想气动形体模型阻力系数与地效的关系

Fig.6 Curves of drag coefficient of aerodynamic optimization shape and ground effect

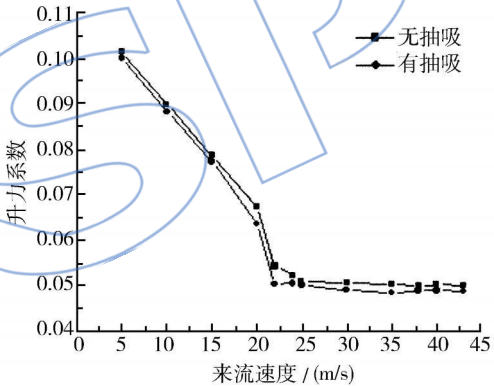


图 7 理想气动形体模型升力系数与地效的关系

Fig.7 Curves of lift coefficient of aerodynamic optimization shape and ground effect

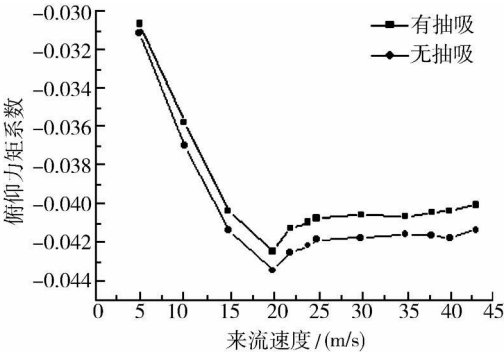


图 8 理想气动形体模型俯仰力矩系数与地效的关系

Fig.8 Curves of pitching moment coefficient of aerodynamic optimization shape and ground effect

4 结 论

车身气动造型分为局部优化和全局优化, 其中全局优化代表了当今和未来车身气动造型的发展趋势, 本文从全局优化的方法出发, 构建了一个具有优良气动性能可用于车身气动造型的理想形体, 从文中可以得出如下结论:

1) 汽车的气动性能取决于车身外形结构参数, 可以通过解析的方法确定某一特征参数来获得车身的初步气动优化外形, 从而可以节省车身前期气动优化的时间和经费(减少风洞试验数量);

2) 理想气动形体优良的弯度线(特征构造线), 使得理想气动形体具有优良的外部流线, 这种优良的流线不仅决定了理想气动形体拥有较小的气动阻力(好的燃油经济性)、而且使得该形体具有较低的气动升力和较小的俯仰力矩(好的高速操纵稳定性);

3) 进一步的研究将是构建车身气动造型优化智能设计平台, 即通过如轮距、轴距及发动机机舱结构参数等几个特征参数的输入, 在 CAD 系统中自动生成具有优良气动性能的可用于车身实际造型的气动形体。

参考文献:

- [1] Morrelli A. The body shape of minimum drag[R]. SAE Transactions 760186, 1976.
- [2] HUANG Xiangdong. New theoretical method of automotive aerodynamics[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 1996, 9(2): 100-109.
- [3] 黄向东, 谢朝林, 肖超强. ICAS 车身造型方法的风洞试验研究[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2000, 28(6): 6-10.
HUANG Xiangdong, XIE Chaolin, XIAO Chaoqiang. Research on an Intelligent computer aided car body styling method with wind tunnel tests[J]. Journal of South China

University of Technology (Natural Science Edition), 2000, 28(6): 6-10. (in Chinese)

- [4] Sakamoto H, Arie M. Vortex shedding from a rectangular prism and a circular cylinder placed in a turbulent boundary layer[J]. JFM, 1983, 126: 147-165.
- [5] 傅立敏. 汽车空气动力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
- [6] 蓝天, 康宁, 郑昊. 直背式轿车起动过程中气动现象的研究[J]. 航空动力学报, 2007, 22(11): 1868-1873.
LAN Tian, KANG Ning, ZHENG Hao. Study of aerodynamic characteristics of fastback car in starting process[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(11): 1868-1873. (in Chinese)
- [7] 郑昊, 康宁, 蓝天. 侧风环境下行驶的直背式轿车气动力计算[J]. 航空动力学报, 2007, 22(11): 1858-1862.
ZHENG Hao, KANG Ning, LAN Tian. Calculation of aerodynamic forces of a car with the effect of crosswind[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(11): 1858-1862. (in Chinese)
- [8] Ahmed S R. Influence of base slant on the wake structure and drag of road vehicles[J]. Journal of Fluids Engineering, 1983, 105: 429-434.
- [9] 何忆斌, 谷正气, 吴军, 等. 新概念汽车模型风洞试验研究[J]. 汽车工程, 2007, 29(4): 267-269.
HE Yibin, GU Zhengqi, WU Jun, et al. An experimental study on the aerodynamic characteristics of new concept car by the wind tunnel test[J]. Automotive Engineering, 2007, 29(4): 267-269. (in Chinese)
- [10] 谢金法, 庄继德, 高峰, 等. 模型轿车空气动力特性的研究[J]. 中国机械工程, 2000, 11(7): 817-819.
XIE Jinfa, ZHUANG Jide, GAO Feng, et al. A testing research on the aerodynamic characteristics of typical automobile model[J]. China Mechanical Engineering, 2000, 11(7): 817-819. (in Chinese)
- [11] 黄向东. 汽车空气动力学与车身造型[M]. 北京: 人民交通出版社, 2000.
- [12] 何忆斌. 汽车车身气动造型优化研究及工程应用[D]. 长沙: 湖南大学, 2008.
HE Yibin. Aerodynamic styling optimization research for automobile body and engineering application[D]. Changsha: Hunan University, 2008. (in Chinese)