

低阻车身体体的参数化建模与气动试验

韦 甘, 杨志刚, 李启良

(同济大学 上海地面交通工具风洞中心, 上海 201804)

摘要: 用控制点和曲线对车身的侧视图、俯视图和横截面图进行参数化, 结合试验设计和局部加密的方法对 2 维车身进行优化得到全局较优解。从 2 维优化车身出发, 构建不带车轮的 2 个 3 维车身体体。计算得到它们的气动阻力系数分别为 0.057 和 0.089, 可以作为低阻形体为理想车身的相关研究提供参考。缩比模型的风洞试验结果与数值计算结果基本吻合, 验证了低阻车身体体参数化建模方法的可行性。

关键词: 汽车; 低阻车身; 参数化建模; 气动优化; 风洞试验
中图分类号: U467.13 **文献标志码:** A

A Parametric Modeling Method of Low-drag Car Body and Aerodynamic Test

WEI Gan, YANG Zhigang, LI Qiliang

(Shanghai Automotive Wind Tunnel Center, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: The frontal view, top view and cross-sections of low-drag car body were parameterized with control points and curves. Then the two-dimension car body was optimized by design of experiments and local refinement methods. The global optimum results were obtained. Two three-dimension car bodies without wheels were built based on the optimized two-dimension car bodies, and their coefficients of aerodynamic drag were as low as 0.057 and 0.089 respectively. They could serve as low-drag basic bodies for the future research of an ideal car. The agreement between test results and numerical results indicates that this parametric modeling method of low-drag car body is feasible.

Key words: vehicles; low-drag car body; parametric modeling; aerodynamic optimization; wind tunnel test

降低 C_D (气动阻力系数) 是降低汽车能耗的重要措施。低阻车身体体是降低车身气动阻力系数的

最大潜能, 为实车气动优化提供重要参考。随着电动汽车技术的发展, 车身布置发生重要变革, 车身造型约束因素的减少使得低阻车身体体可以更直接地为车身造型提供参考, 从而大幅度降低气动阻力系数成为可能。

国外关于低阻车身体体的研究较早, 结合数值模拟工具和风洞试验得到一系列低阻车身体体, 如 VW-Blunt Body 和 VW-Flow Body 等。带车轮的情况下气动阻力系数达到 0.14~0.16, 不带车轮的情况下气动阻力系数达到 0.07~0.09^[1]。美国福特“探索者”系列低阻概念车的气动阻力系数从 1979 年 Ford Probe I 的 0.25 一直下降到 1985 年 Ford Probe V 的 0.137。国内傅立敏从空气动力学观点推测了最理想的车身外形, 并总结了车身最佳气动外形的基本特点^[2]。2010 年何忆斌等人^[3]参考飞机翼型截面设计理论, 先利用气动阻力、气动升力和俯仰力矩作为约束条件构造弯度线, 然后构造车身中截面, 在中截面的基础上考虑机件布局和乘坐舒适性构建 3 维曲面, 得到一个具有较低气动阻力的车身体体。

本文从 2 维侧视图车身反推车身弯度线, 在 2 维车身的优化过程中考虑了地面效应对车身外流场的影响^[4], 把气动阻力系数作为车身评判的主要标准, 构建低阻车身体体并进行风洞试验验证。

1 数值建模方法

1.1 车身各视图的参数化

固定车身长度和离地间隙在量产 A 级车可接受范围内, 选取长高比为 3.0。各个视图都选取合适的控制点和控制曲线。如图 1a 所示, 侧视图使用 9 个控制点, 其中 1~6 点为基本控制点, 受固定车长和车高的约束; 其余 3 点起到过渡的作用。尾端和底部

收稿日期: 2012-12-25

基金项目: 国家“九七三”重点基础研究发展计划 (2011CB711203); 上海市科学技术委员会重点实验室计划 (11DZ2260400)

第一作者: 韦 甘 (1987—), 女, 博士生, 主要研究方向为车身气动优化。E-mail: weigan87@163.com

通讯作者: 杨志刚 (1961—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为流体力学。E-mail: zhigangyang@tongji.edu.cn

的控制点间用直线连接,其他控制点间用曲线段连接.分段曲线满足以下条件:过控制点;连续可导;单调递增或递减,防止出现拐弯现象和超出限定车长和车高的现象.用12个参数确定9个控制点的坐标,用1~100的整数对参数进行编码.俯视图和横截面图都使用4个参数确定5个控制点的位置.这种参数化方法可以通过修改参数的变化范围、增加基本控制点、改变控制点和曲线的约束条件等方法,简便快速地构造各种造型风格的车身.例如,图2a中的长高比例不同的车身,图2b中两厢车造型风格的车身.

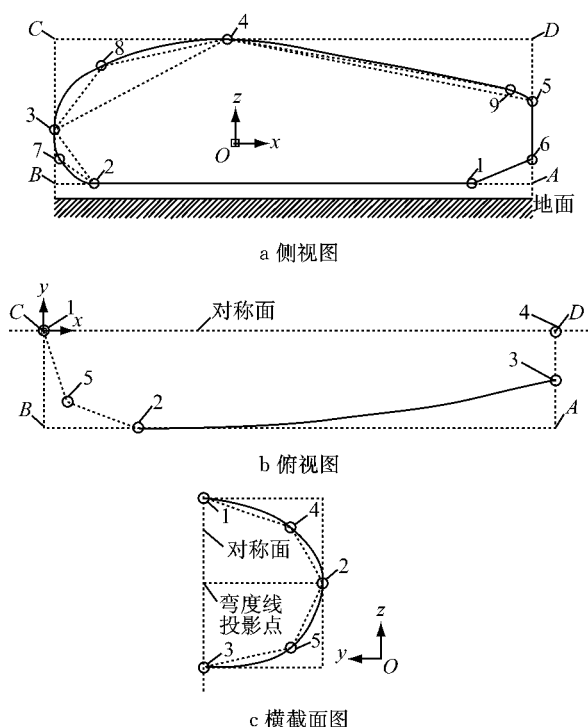


图1 各视图的参数化示意图

Fig.1 Schematic of parameterization of different views

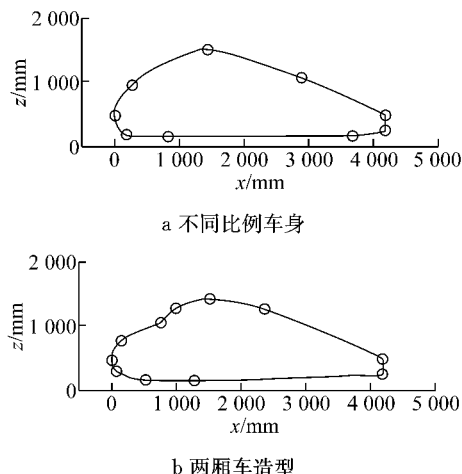


图2 其他造型风格的车身

Fig.2 Bodies in other styles

1.2 数值模拟与优化方法

使用网格生成软件的脚本功能配合 Matlab 软件实现网格全自动化生成,用 Fluent 软件进行数值模拟计算.计算区域在来流方向为7倍车长,以保证能够较好地模拟复杂而关键的尾流区.来流速度设为 $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,地面边界条件设为移动壁面,湍流模型选用可实现 $k-\epsilon$ 模型.单个2维算例约有20万非结构网格;单个3维算例约有2000万混合格网.

为了解决优化参数数量较多和数值计算量大的问题,结合试验设计方法(DOE)和局部加密的方法对2维车身进行优化.第一步,使用优化拉丁方法在整个优化空间均匀布点并进行数值模拟计算.第二步,选取已计算过的所有算例中气动阻力系数最小的前几种车身作为中心点进行加密得到下一代车身.所使用的加密算子类似于遗传算法^[5]中的变异算子.它具有半随机的特性,避免了传统梯度法中对优化方向的判断.因为在第一步时已经搜寻了足够多的均匀分布的参数组合模式,所以在局部加密的时候变异步长不需要过大.通常控制在参数变化范围的40%以内.因为所有算例都会得到保留,所以初期变异概率最大可达0.9.第三步,迭代进行加密,逐渐缩小变异步长和变异概率,逐渐减少加密中心点,迭代至最小气动阻力系数不再下降.气动阻力系数最小的车身就是优化得到的2维车身.

1.3 3维车身的建模方法

车身的2维侧视图最能反映车身外流场特征,所以把侧视图当作3维建模中最主要的因素.俯视图和横截面图作为辅助.俯视图车身的优化方法和侧视图的优化方法基本相同.为了简化优化过程,横截面图的参数没有参与优化,而是根据车内空间的需要决定参数值.通过优化方法确定了侧视图和俯视图后就可以推导出车身弯度线和升力面位置,然后沿来流方向按一定间隔取截面构造车身侧视图.图1c横截面图参数示意图中的1,3点是2维侧视图上下车身线在横截面上的投影,两者中点是弯度线在该横截面上的投影,与弯度线投影同高的2点是2维俯视图车身在该横截面上的投影.4,5过渡点根据该横截面的参数确定.沿纵向构造一系列横截面,连接起来就得到整个车身外表面的曲面.通过保证弯度线的连续和可导性可以保证曲面的光滑与平顺.

2 结果与分析

2.1 2维车身的优化结果

在2维侧视图车身的优化过程中,第一步中均

匀分布样本点的计算结果中 C_D 最小值为 0.091; 经过 16 代的局部加密, 最小 C_D 值降至 0.068, 迭代在 15 代左右收敛, 整个优化过程中的数值计算次数小于 400 次。2 维俯视图车身的优化参数较少, 所以在第 8 代左右就已经收敛。这种优化方法针对气动优化的特点, 结合了传统 DOE 和遗传算法的优点, 在尽量减少数值计算次数的前提下找到全局较优值。

图 3a 的 2 维优化侧视图车身具有最高点靠前、尾部较低而且过渡平缓、底部后翘部分长的特点, 符合前人研究的结论^[2]。图 3b 的 2 维优化俯视图车身头尾细窄, 尾部气流基本没有发生分离, 气动性能很好。但俯视图在应用到 3 维车身时发生的 3 维形变较大, 不像侧视图那样可以完全落在中截面上, 所以 2 维俯视图车身的优化结果只作为 3 维建模时的参考。

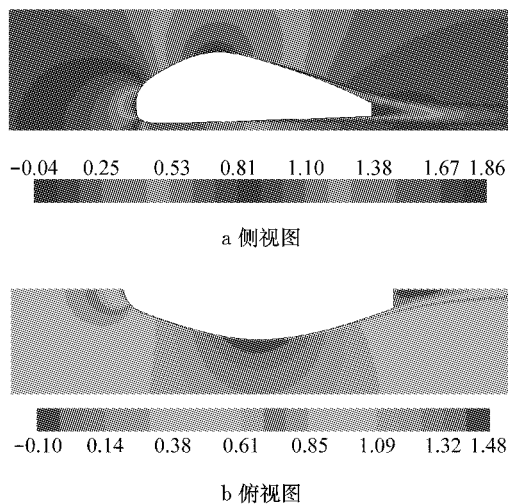


图 3 2 维优化车身周围的量纲一化的速度云图
Fig.3 Dimensionless velocity contour along the 2-dimension optimized car

2.2 3 维低阻车身体形

根据前面叙述的方法, 分别建立图 4 中的 A, B 两种低阻车身体形。形体 A 的侧视图和俯视图都取自图 3 所示的全局较优解。形体 B 的侧视图与形体 A 相同, 但俯视图和横截面图考虑了车身布置等综合要求, 底部宽平, 头部和尾部较宽大, 但车宽比形体 A 窄, 更接近于实车。

表 1 列出了两种形体的基本特性。形体 A 的压差阻力系数和摩擦阻力系数几乎相等, 这是低阻车身体形的理想状态。形体 B 的摩擦阻力系数近似于形体 A, 但压差阻力系数接近摩擦阻力系数的 2 倍。比较两种形体的表面压力系数云图(图 5), 两者尾部

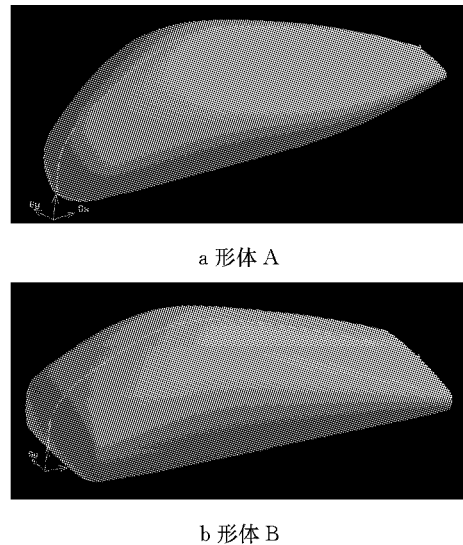


图 4 两种低阻车身体形的数字化模型
Fig.4 Two different digital models of low-drag car body

表 1 低阻车身体形的气动特性和形体参数
Tab.1 Aerodynamic characteristic and geometrical body parameter of low-drag car bodies

形体	压差阻力系数	摩擦阻力系数	气动阻力系数	迎风面积/ m ²	体积/ m ³
A	0.030	0.029	0.059	1.641	4.016
B	0.058	0.031	0.089	1.773	5.047

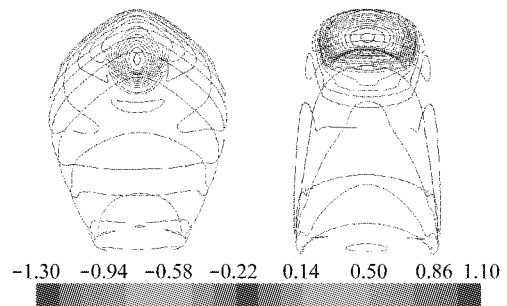


图 5 车身表压力系数云图
Fig.5 Pressure coefficient contour on body surfaces

都没有明显的负压区, 这是两者气动阻力系数都较低的主要原因。形体 B 尾部的正压区的数值比形体 A 小, 头部前端因为较宽, 导致正压区面积明显比形体 A 大, 这是形体 B 的气动阻力系数较形体 A 偏大的主要原因。

形体 A 的气动阻力系数达到了极低的 0.059, 但迎风面积和体积较小, 不满足现有大部分汽车车身布置的需求。形体 B 的气动阻力系数为 0.089, 在前人试验值 0.07~0.09 的范围内, 而且形体 B 的迎风面积和体积分别比形体 A 大 0.13 m² 和 1.03 m³, 更能满足车身布置等方面的综合要求。

3 缩比模型的气动试验

选用低阻车身体形 A 为试验对象,制作 1:15 缩比模型,在模型风洞中进行风洞试验,如图 6 所示.模型风洞为开口回流式,最高风速为 $49 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,试验段宽 1.185 m,高 0.818 m.模型全长 0.280 m,在底部用单根支撑柱固定,模型阻塞比为 0.061.



图 6 缩比模型的风洞试验
Fig.6 Wind tunnel test for scaled model

如图 7a 所示,沿模型中截面分布有 20 个直径为 1 mm 的测压孔.图中黑圈表示车身侧视图的 9 个控制点,有 5 个测压点与控制点重合,这是因为这些位置的流场信息能够捕抓外流场的重要结构特征.

图 7b 为风洞试验的结果,车身中截面测点的 C_p (静压系数)在不同速度下的变化趋势基本相同.测点 7 为车头驻点,动压完全转化为静压,所以静压系数接近于 1;从测点 7 开始,车顶曲线先逐渐升高至最高点测点 11,然后逐渐下降至车尾,前部分的收缩效应和后部分的扩散效应使车顶表面气压随之先下降后升高.测点 17 位于车尾分离区,压力较小.车身底部曲线从测点 6 开始,先下降到靠近测点 5 的最低点,然后逐渐升高,前部分的收缩效应和后部分的扩散效应使车底表面气压随之先下降后升高.在底部支撑柱附近没有布置测压孔.车底后部向上翘起,从测点 20 到测点 18 因为扩散效应气压逐渐增大.测点 12 距离车身模型前后结合缝最近,结合缝处在填补胶泥后依然可能因为干裂等原因出现细小的缝隙,当来流速度较高时可能发生漏气现象,使得结合缝附近的气压降低,这是测点 12 的静压系数试验测量值的绝对值随着来流速度增大而逐渐下降的主要原因.

图 7c 对比了风洞试验结果和数值计算结果.图中, x/L 为测点位置与车长的比值.因为数值模拟使用 $k-\epsilon$ 湍流,在计算过程中模型假设所有流体区域都处于湍流状态,而实际上车体表面附近的流动是从

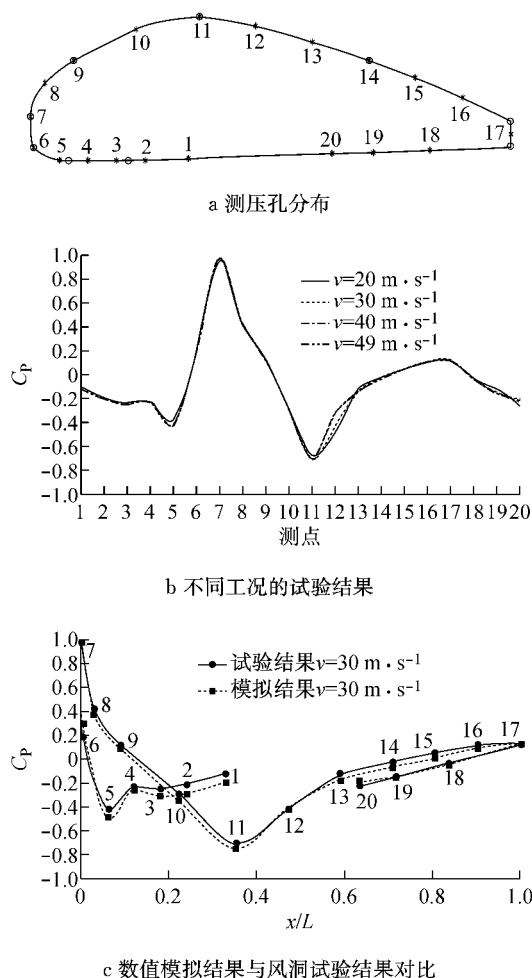


图 7 车身表面静压系数 C_p
Fig.7 C_p on the surface of car body

层流状态转换至湍流状态,所以数值计算结果中的负压区绝对值比风洞试验值普遍偏大.测点 1, 2, 3 因为距离支撑柱较近,支撑柱与地板连接处的孔洞在安装完模型后进行修补,但不可避免地会留下缝隙或不平,漏气现象使附近气流减速,气压升高,所以这 3 个点的静压系数试验值较数值计算值偏大.测点 6 处的车身曲面变化较剧烈,加工的测压孔很难保证与曲面垂直,造成试验结果与数值结果偏差较明显.因为上述提到的结合缝的不平整性和漏气现象,流经车顶后半部分的气流减速,气压增大,前后车身结合缝后面的测点 13, 14, 15 的静压系数试验值比数值计算值稍偏大.

总体看来,车身中截面上静压系数分布的风洞试验结果和数值计算结果基本符合,测点的误差都在可以接受的范围内.风洞试验的结果验证了本文所使用的数值方法的可靠性,也验证了本文提出的优化方法和建模方法的可行性.

(下转第 781 页)