

CFD 技术在汽车外 CAS 开发中的应用

Application of CFD analysis method in vehicle exterior design

许志宝 邓玉伟 夏广飞
(安徽江淮汽车股份有限公司 技术中心)

摘要: 本文利用 STAR-CCM+软件对某款汽车的外流场进行模拟, 阐述 CFD 在汽车造型设计中的应用, 为车身气动外形的初选提供依据, 方便、直观地了解汽车周围空气的流动状况, 并应用压力系数分布图分析造型中存在问题, 计算出整车的风阻系数, 为进一步细化设计提供依据。同时, 本文通过将计算结果和试验结果对比, 证明了 CFD 方法的可行性及有效性。

关键词: 汽车, STAR-CCM+, 造型, CFD

Abstract : This article simulates the flow field around the car by using STAR-CCM+ software and describes CFD analysis method for exterior design and development, which provides suggestion to styling. We can get information of the air flow besides the vehicle, and find problem in styling design by pressure coefficient distribution chart, calculate the Cd of full vehicle .Then the detailed design will based on the result of this analysis. Also, we compare the test and analysis result for verification, Proving the feasibility and effectiveness of the CFD.

Keywords: vehicle, STAR-CCM+, vehicle exterior design, CFD

1. 前言

空气动力特性是汽车, 尤其是轿车车身造型设计中起支配作用的因素, 是整车性能指标中不可忽视的部分。

汽车空气动力学仿真分析是借助于计算机将 CFD 应用于汽车空气动力学研究的一种方法。亦即运用数值分析的方法计算模拟汽车的空气动力学问题, 为指导设计获得良好的汽车外形造型提供科学依据。与风洞实验相比, 汽车空气动力学计算机仿真除了节省开发时间和费用外, 还有利于与 CAD/CAM 系统相衔接, 并可获得比风洞实验更多的信息。CFD 汽车空气动力学造型与汽车美学造型之间即对立又统一, 两者之间存在一个协调的过程。一个优秀的车身造型不仅是美的艺术品, 更是符合空气动力学的科学产品。因而可以说, CFD 旨在追求汽车空气动力学造型与汽车美学造型之间的完美统一。

本文通过对某款轿车的外流场进行分析, 了解整车的气动特性, 按照低阻车型设计的原则, 提出改进建议, 并且为车型选型提供技术支持。

2. 模型建立

2.1 基本理论

控制所有流体流动的基本定律是：质量守恒定律、动量守恒定律和能量守恒定律。由它们可以分别导出连续性方程、动量方程和能量方程。

由质量守恒导出的连续性方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho v) = 0 \quad (1)$$

由动量守恒导出的运动方程

$$\rho \frac{dv}{dt} = \rho F + \text{div} P \quad (2)$$

由能量守恒导出的能量方程

$$\rho \frac{dU}{dt} = P : S + \text{div}(k \text{grad} T) + pq \quad (3)$$

状态方程

$$p = f(\rho, T) \quad (4)$$

以及本构方程

$$P = -pI + 2\mu(S - \frac{1}{3}I \text{div} V) + \mu' I \text{div} V \quad (5)$$

其中 ρ 、 F 、 V 、 P 、和 U 分别代表流体的密度、力、速度、压力和总能量。 μ 、 μ' 为粘性系数， k 为热传导系数， T 代表温度， S 为变形速度张量。

对上述控制方程采用有限体积法进行求解计算，压力项和速度项之间的耦合计算采用 SIMPLE 算法。由于 $\kappa-\varepsilon$ 模型只适用于离开壁面一定距离的湍流流域，因此对于壁面附近的区域，采用壁面函数法处理。

在空气动力学中，任一运动物体所受到的空气阻力可表为：

$$F_d = \frac{1}{2} \rho v^2 C_d A$$

式中： F_d —空气阻力； ρ —空气密度； v —汽车行驶速度； C_d —空气阻力系数； A —汽车迎风面积； C_d 通常被认为是形状、诱导和表面摩擦三个气动阻力分量系数之和，即 $C_d = C_s + C_i + C_f$ 。其中 C_s 为形状阻力系数，与物体外形或气流在形体周围产生涡流的程度有关， C_i 为诱导阻力系数，通常认为正比于物体所受空气升力的平方， C_f 为摩擦阻力系数，与形体掠气表面积的大小等因素有关，它与前两个系数相比一般是个可忽略的量。

2.2 计算模型建立

根据某车型的三维 CAS 模型，在 Hypermesh 中进行前处理。由于汽车车身表面存在大量细小特征，这是生成质量较好网格的一大障碍，介于软硬件及成本的限制，在处理计算模型的时候将要对几何数模进行合理的简化，如车灯、后视镜、门把手凹陷处及轮胎等部件，以平整面替换车底的真实凹凸形状。然后将车身表面和底盘的碎面缝合起来，形成若干个大的特征表面，即将整个汽车简化为封闭的壳体；再在汽车四周形成一适当的空气域（如 $40\text{m} \times 10\text{m} \times 8\text{m}$ ）。为了减少计算量，这里使用半车模型计算，模型如图 1 所示：

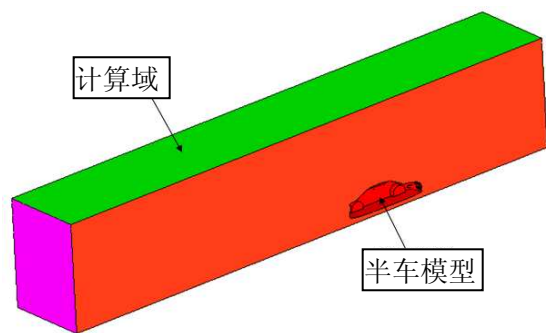


图 1 几何模型

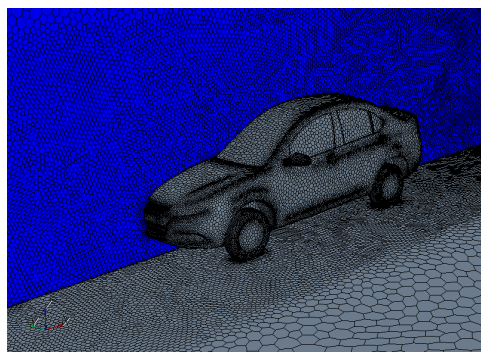


图 2 网格模型

将封闭的空腔模型导入 STAR-CCM+软件后再生成多面体网格，由于主要关心车身周围的流场变化，所以细化近汽车壁面处的网格（单元大小应模拟车身附近气体小漩涡的尺寸），随着远离车身外表面适当放宽网格的大小，以控制网格的规模。半车单元总数约三、四百万，网格总体连续、均匀、美观，过渡平缓，网格模型如图 2 所示。

2.3 边界条件

设定模型入口的风速为 100Km/h，无侧风影响，出口边界条件为自由条件；空气的密度为 1.228 kg/m^3 ；计算中不考虑温度的影响；由于计算机硬件条件的限制，采用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模式和 non-equilibrium wall functions 壁面函数；紊动能 k_{in} 和紊动能的耗散率 ε_{in} 由经验公式计算确定；计算选择二阶迎风格式；收敛判断条件的所有物理量的容差为 $1.0\text{E-}4$ 。

3. CFD 仿真分析结果

3.1 车身压力分布

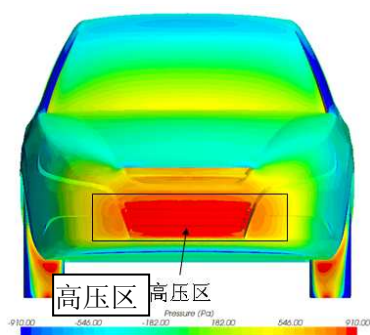


图 3 车身表面压力分布图

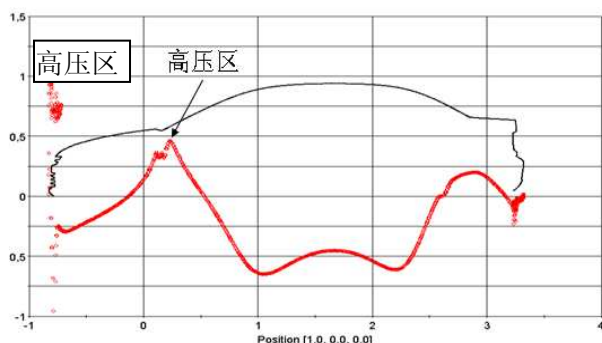


图 4 对称面压力系数图

从图 3 可以看出，在车头处存在一个高压区，下格栅的进风区域比较合理，上格栅的进风效率会有些影响。图 4 显示：高压区位于挡风玻璃上，此高压区稍微偏上，最好位于机舱盖与挡风玻璃交界处，这样有利于空调进风。从前挡风玻璃下沿稍高处到车顶，压力开始快速的减小。从后挡风玻璃上端到其下端，压力快速升高，有利于降低阻力。从后挡风玻璃下端到后备箱尾部，压力下降较快，这样会增大压差阻力，建议对后备箱外表面进行抬高处理。

3.2 车身表面剪切压力分布

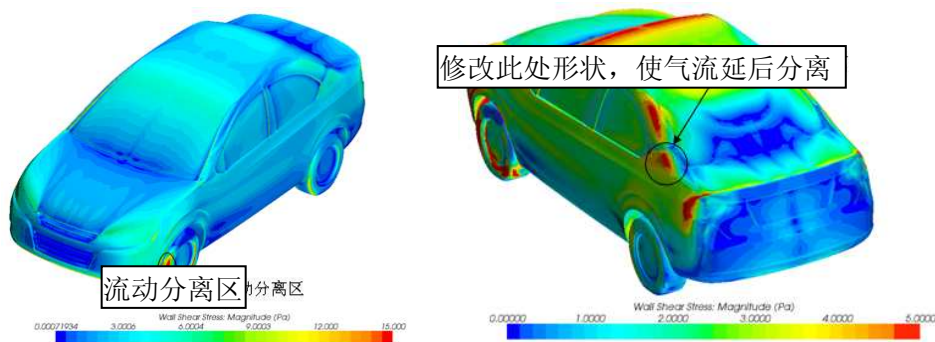


图 5 车身表面剪切压力分布图

图 5 所示为车身表面剪切压力分布图，从图中可以看出，在轮胎前部及 C 柱剪切压力较大，气流发生了分离，建议将 C 柱流线型设计，使气流延后分离。

3.3 尾涡分布

在车的尾部产生两个尾涡流，下部的涡流在后保险杠处，虽然涡流尺度较小，影响范围较小，有利于降低气动阻力，但离车身较近，从车底过来的气流受车身上部气流的压制，其带动的灰尘会上扬到后备箱处，不利于车辆的清洁，建议修改后保险杠下底面的倾角，使下部的涡流远离车身。

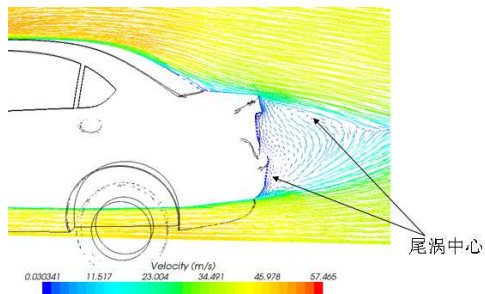


图 6 车身对称面处尾涡速度矢量图

3.4 风阻系数

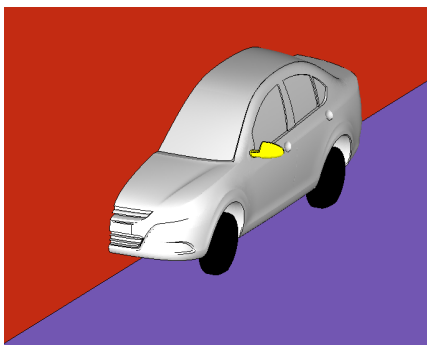


图 7 计算模型图



图 8 油泥模型风洞实验图

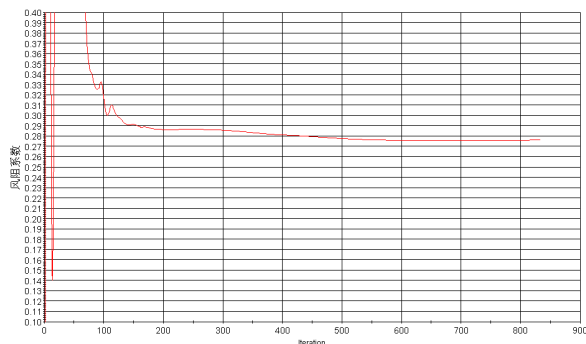


图 9 计算时风阻系数监视图 (0.276)

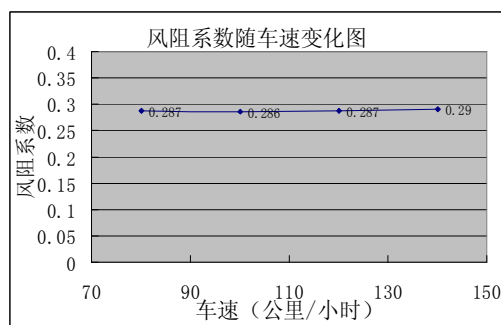


图 10 实验测试结果图 (随车速变化)

表 1 为风阻系数的计算结果与实验结果的对比表，从表中可以看出，实验结果与分析结果差值很小。说明通过 CFD 方法可以有效的对汽车风阻进行计算。

表1 风阻系数对比表

	计算结果	实验结果	差值
风阻系数	0.276	0.2875	4%
迎风面积 (m ²)	1.929	1.919	0.5%

4. 结论

运用计算流体动力学技术深入研究车身造型, 可以节约物理风洞试验成本, 促进既符合美学原理, 又合乎气动力学特性的完美车身造型的出现。

1) 在车型开发的早期阶段运用 CFD 仿真分析外流场特性可以为车身的造型提供有力的技术支持。

2) 通过压力分布可以评估发动机舱和空调进风效率, 尾涡分析可以考查后保险杠设计和评估车身尾部泥污染。

3) 将仿真分析所得车身风阻系数与实验结果进行了对比, 表明分析结果具有相当的精度, 证明了 CFD 方法的可行性及有效性。

5. 参考文献:

- [1] 谷正气, 汽车空气动力学. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- [2] 黄向东. 汽车空气动力学与汽车造型. 人民交通出版社, 2000 年.
- [3] 王福军. 计算流体动力学分析—CFD 软件原理与应用. 清华大学出版社.
- [4] 姜岩, 康宁. 尾翼定位对斜背式轿车气动特性影响的研究[J]. 车辆与动力技术, 2004, (3): 9 ~ 131.
- [5] 轿车风洞试验报告. 2007 年.