

乘用车车身底部气动特性分析

The Analysis of Aerodynamic Characteristics Applied in the Bottom of a Passenger Car

史建鹏, 郭军朝, 陈皓, 王伟民
(东风汽车公司技术中心 湖北武汉 430056)

摘要: 本文以 starccm+3.06 软件为主要工具, 采用标准 $\kappa-\varepsilon$ 湍流模型针对轿车车身底部流场进行数值模拟, 同时也较好地对该底部流场的气动参数的分布特性进行了深入的分析。

关键词: 气动特性, 外部流场, 湍流模型, CFD

Abstract: The standard $\kappa-\varepsilon$ turbulence model has been adopted to simulate the under-vehicle air flow with software starccm+3.06 in this paper. Meantime, a better and more detailed understanding is given to the physical mechanism of this under-vehicle airflow field and the aerodynamic performances of a car body.

Keywords: Aerodynamic behaviors, External Airflow Field, Turbulence model, CFD

1 引言

气动特性分析是汽车, 尤其是轿车的重要性能评价指标之一。气动特性研究的方法主要有风洞试验法和数值仿真法。由于风洞试验在流场分析过程中存在局限性, 而数值仿真又有诸多的优点, 因此数值仿真在轿车气动性能分析中受到了广大工程技术人员的重视。但由于受数值计算方法、计算流体力学以及计算机等本身的制约, 数值仿真不能完全等同于风洞试验。二者在轿车气动特性分析中是相辅相成的。

本文是笔者运用 starccm+3.06 软件, 针对某车型进行了车身外流场的数值仿真模拟, 对该车型的底部气动特性进行了分析和研究。本文对轿车车身流场的分析有利于改善高速运动轿车的气动布局和提高轿车的气动特性。

2 基本控制方程

汽车周围空气运动速度相对声波传播速度较低, 空气的密度变化不大, 可近似为常数, 这种流动称为不可压流动。由于空气相对于汽车作低速流动, 空气的热传导率很低, 在不可虑汽车机舱热管理的前提下, 汽车因运动对周围流场的热影响可以忽略, 即二者之间在不考虑热辐射、热对流的前提下, 二者的热交换量为零, 因此在汽车外流场基本方程的分析中不考虑能量方程的存在。因此, 汽车周围空气流场可视为三维定常不可压粘性等温流场来处理。

控制方程属于非线性的偏微分方程, 在极难求解析解的情况下, 采用有限体积数值方法求解控制流体流动的数学方程, 从而研究汽车周围空气的运动的规律。有限体积法的物理解释: 该控制体积在随空气运动的同时, 因其本身所包含的气体“微团”数量不因时间的改变而变, 质量恒定, 从而满足了质量守恒定律的物理原理。

连续方程（质量守恒方程）

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = S_m \quad S_m=0, \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

有限体积中运动的气体“微团”在受到自身力、其周围因压强分布不均而产生的压力以及周围环境对该“微团”因摩擦而产生的剪切力满足牛顿第二定律，推导得如下 Navier-Stokes 动量守恒方程^[1]。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i \quad (2)$$

以上为惯性坐标系下， i 方向的动量守恒方程。 p 是静压； τ_{ij} 是应力张量，定义为：

$$\tau_{ij} = \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \delta_{ij}。 \text{重力和体积力不考虑的情况下，} \rho g_i, F_i \text{ 的值均为 } 0。$$

在计算中，我们采用了标准 $k-\varepsilon$ 模型，该模型是以一方程模型为基础，引入湍流耗散率 ε 而形成，其针对于湍流发展非常充分的湍流流动。它不适用于对近壁区内流场的模拟，例如汽车外流场地板附面层的气动力特性分析。该模型中， k 和 ε 是两个基本未知量，湍动能 k 和耗散率 ε 对应的输运方程为如下：

$$\begin{aligned} \rho \frac{Dk}{Dt} &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M \\ \rho \frac{D\varepsilon}{Dt} &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (3)$$

G_k 示由平均速度梯度引起的湍动能 k 产生， G_b 是用于浮力影响引起的湍动能 k 产生，此时 0； Y_M 可压湍流脉动膨胀对总的耗散率的影响，此时为 0。方程(3)中经验常数如下设置， $C_{1\varepsilon} = 1.44$ ， $C_{2\varepsilon} = 1.92$ ， $C_\mu = 0.09$ ，

湍动能 k 与耗散率 ε 的湍流普朗特数分别为 $\sigma_k = 1.0$ ， $\sigma_\varepsilon = 1.3$ 。

3 几何建模和网格剖分

本算例以某车型为例进行气动力特性的数值模拟，其三维几何模型和计算区域均是利用 CATIA5.0 进行前期建模，如图 1 所示的车身几何模型草图。计算区域是一长为 5 倍车长（车前为两倍车长，车后为两倍车长）、宽为 3 倍车宽、高为 4 倍车高的三维数值风洞，如图 2 所示的内置轿车的数值风洞几何模型。

网格生成是计算流体力学作为空气动力学工程应用的有效工具所面临的关键技术之一，其目的是研究计算区域内具有对物理尺度分辨率高的最优网格布局。在复杂流动中，流场的非均匀性要求在流动参数梯度变化较大的区域进行加密网格，使之能正确模拟其流动特征。如粘性绕流中壁面附近边界层内的流动^[3]。本例的网格划分是运用 ICEM CFD 11.0 完成的，如图 3 所示。

采用对复杂计算区域适应能力很强的非结构网格对轿车模型的外表面和整个计算区域分别进行了三角形和四面体为单元的空间网格划分，在模型底端也设置了平行于壁面的边界层，划分出了高质量的网格。图 1-4 表示乘用车外流场分析时用的几何模型、相关区域的网格。

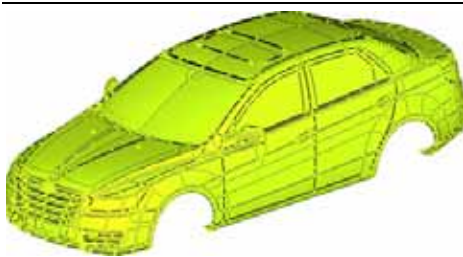


图 1 车身几何表面



图 2 车身表面网格



图 3 底板光滑处理

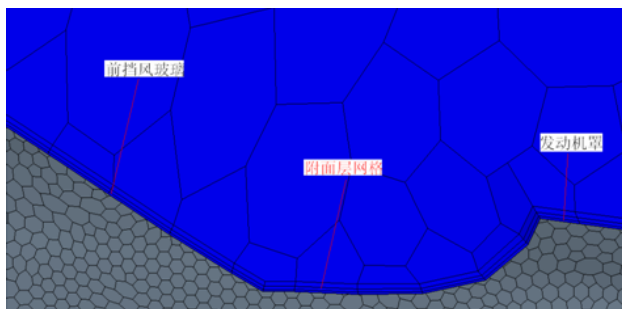


图 4 发动机罩与前风窗过度区域边界层网格

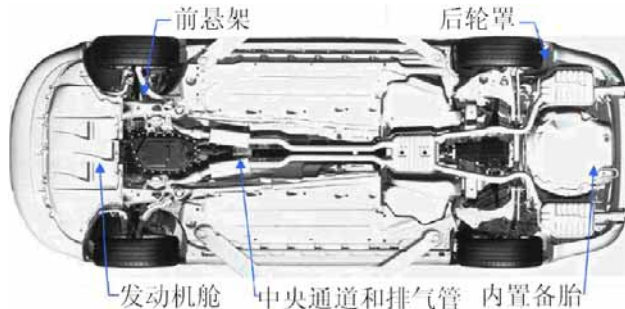


图 5 车身底部复杂形式

前方来流从前保险杠下缘流经图 3 所示的光滑底板时,遇到的阻力比较小,气流速度较快,则由车身上下表面引起的升力比较小,因而产生的诱导阻力也较小。发动机、排气管、油箱、备胎等部件的形状使得车身地板变的凹凸不平,如图 5 所示,当前方来流流经这些区域时遇到的阻力较大,气流速度会降低,车身表面压差会增加,也即升力会增加,诱导阻力也会增加;气流因遇到阻碍而从两侧流出,降低了排气管系统的冷却效率^[4]。

4 边界条件

汽车外流场的数值仿真是在有限区域内进行的,所以在区域的边界上需要给定边界条件,边界条件要求在数学上满足适定性,在物理上有明显的物理意义。边界条件包括定义边界条件的几何位置信息(如进出口、固壁表面、对称表面等)和确定边界上的各种参数信息(如速度、压力、总压、静压、温度等)。现实生活中高速汽车行驶在静止的路面上,汽车周围的空气流动可以理想化为平行于路面的无穷大均匀流场。但在数值风洞里面,轿车模型周围的流动因受限于有限的空间,使得汽车流场的各流态参数值均有所增加,在阻塞比很小(小于 1/10)时,各参数增加值可近似为零^[5]。

由于运动的空气与静止的地板具有不同的速度是形成边界层的必要条件,因而为减弱或消除因边界层分离而引起的阻力和流动能量的损失,采用了地板与空气同步运动的方法。以该思想为基础,根据伯努利定理,虽然该方法产生了马格斯效应,但是却后延了边界层的分离时间和空间,有效地模拟了轿车底部的复杂流场^[6]。

针对该数值风洞模拟例子而言,控制方程的边界条件为第一类 Dirichlet 边界条件,即计算区域左端 X 方向为速度入口边界条件 $v=30\text{m/s}$, Y、Z 方向的速度均为零。入口处的湍流动能和湍流耗散率因受到周围环境的复杂影响,湍流度较小,取值为 0.5%。计算区域的右端为气体出口,此处设置恒定的压力边界条件, $p=101\ 325\text{Pa}$ 。为了比较贴切地模拟地面对汽车底部流场的影响,该求解区域的底部为可移动的壁面边界条件,其速度等于来流速度大小: $v=30\text{m/s}$, 方向唯一并且与来流相同,与壁面相切。即其底面边界条件存在: $\mathbf{V} \cdot \mathbf{n} = 0$, $\mathbf{n}$ 为底面任一点的单位法向矢量。计算区域的上端、两侧及轿车车身表面均为固定无孔无滑移的壁面边界条件^[7]。

5 仿真与分析

本文示例是在建模工具 (CATIA)、网格划分工具 (ICEM CFD 11.0)、流体计算工具 (STARCCM+3.06) 三者的联合仿真下完成的。本例主要的仿真结果如下: 图 6 为轿车车身表面的流线, 图 7 为绕 A 柱和后视镜空间的流线, 这些区域也是脉动噪声产生的区域。

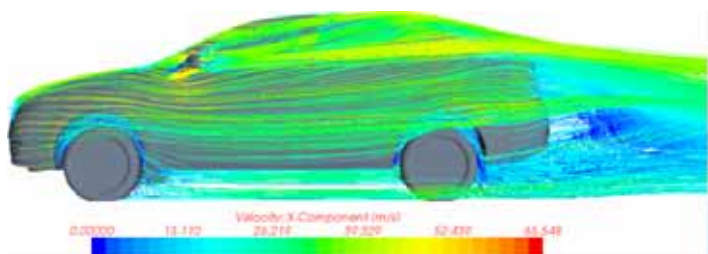


图 6 车身侧面流线图

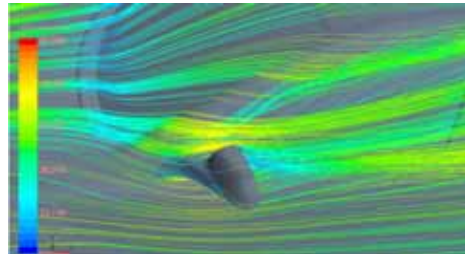


图 7 后视镜区域流线图

图 8 表示车身表面受到的运动空气的压力, 在前保险杠、前围、发动机与前挡风玻璃连接处等处均有明显正压区的存在, 包含滞止区域在内的正压区域有利于发动机舱内部部件的冷却。

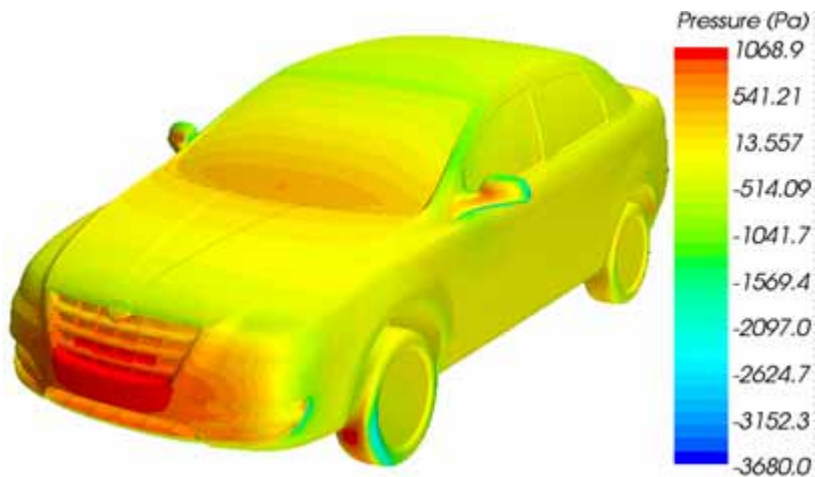


图 8 车身表面压力分布图

图 9 在车身的表面有一速度为零的流线, 保险杠附近有滞点的存在, 前面来流在此处分离为上下两支气流绕车身中性面而运动。图 10 显示该尾流区的负压区域并不是很明显, 表明该造型在尾部处理的较好。

因为车身底部附面层会使得车底气流通道减小, 使得气流加速, 从明显增加了地面效应对升力的影响; 随着附面层厚度沿轴向逐渐增加, 使得车底气流受到阻碍, 车底气流会从两侧溢出, 克服附面层影响从中间流过的部分气流速度也会增加^[8]。

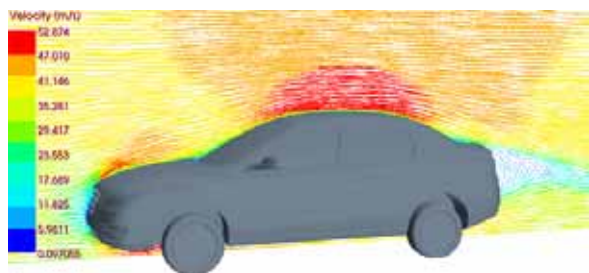


图 9 中性面的速度矢量谱

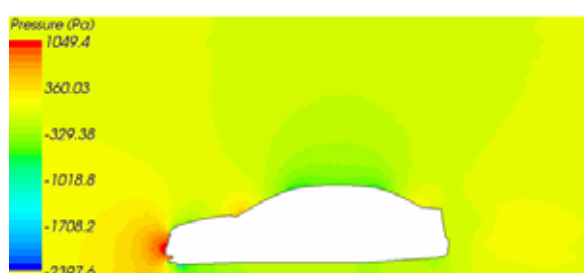


图 10 中性面的压力谱

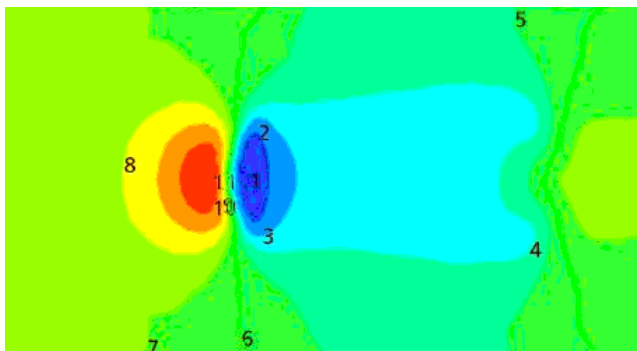


图 11 移动底板壁面的压力分布图

图 11 表示车身中性面上模拟的速度矢量图和压力分布图，分别是移动底板附近气体压力和速度分布的数值仿结果。分析图 11 上面的 1、2、3、4 三个区域是明显的负压区，左侧平行于底板的来流和从前保险杠分离的流向车身底部的气流二者合流后，在一相对狭窄的平行空间内以较大的速度向车身尾部运动，负压由此产生。负压的出现使得气流上卷，也导致泥土上卷，影响车体底部的清洁。

6 结论

因为车身底部形状复杂，提取相关的表面耗费工时比较多，因此本文的仿真分析仅从光滑处理车身底板的角度展开的，综合相关的理论分析与仿真分析得出结论如下：

- 1) 本文分析了光滑底板对乘用车所受气动阻力、升力的影响。密封或光滑处理车身底板可以改善乘用车的气动特性，复杂形式底板降低了燃油经济性和冷却效率。
- 2) 仿真分析汽车外部流场时，对数值风洞地板运动处理可以削弱附面层对车身底部的气流特性的影响，提高仿真精度。
- 3) 乘用车离地间隙是随着车速的不同、路况的不同、乘员人数的不同而变化着，因而会影响车身底部气流特性；乘用车在不同侧偏角下行驶时，复杂形式车身底板对其升力的影响也有待深入研究。

7 参考文献

- [1] John D.Anderson, Computational Fluid Dynamics, The Basics with Applications.
- [2] 王福军. 计算流体力学分析—CFD 软件原理与应用.清华大学出版社.
- [3] 傅德薰, 马延文. 计算流体力学.高等教育出版社.
- [4] 谷正气. 汽车空气动力学.人民交通出版社.
- [5] 庞加斌, 林志兴.TJ-2 风洞汽车模型试验的修正方法.中国科技论文在线.
- [6] 陈懋章.粘性流体动力学基础.高等教育出版社.
- [7] 邓亚东, 江贤军.电动客车外型设计与外流场数值模拟.
- [8] 风洞试验报告.2007.