

文章编号:1000-582X(2004)10-0134-04

小轿车绕流流场的三维数值模拟*

陈景秋,樊雪峰,胡韩飞

(重庆大学 工程力学系,重庆 400030)

摘要:利用商用计算流体力学(CFD)软件 PHOENICS 与 CAD 软件相结合,对长安奥托 SC7081A 型小轿车周围流场进行了三维数值模拟,重点分析了小轿车尾部的湍流情况。结果表明:由于小轿车外形的复杂性和地面效应,面包车周围的流场极其复杂且表现出三维湍流特征;在汽车尾部区域,由于气流在此处突然失去附着,形成马蹄涡和拖拽涡,使尾部气流的流动状况变得更加复杂,大尺度涡的形成使得气流耗散的能量增加,从而使汽车的阻力显著增大。

关键词:汽车空气动力学;CFD;PHOENICS;PARSOL

中图分类号:V211

文献标识码:A

随着汽车技术的提高和高等级公路的发展,汽车实用行驶速度日益提高,汽车在行驶时与空气相作用的气动阻力也越来越显著,它在很大程度上影响着汽车的经济性、动力性和稳定性^[1]。世界性的石油危机使石油价格一度暴涨和严重短缺,研究指出:如能使气动阻力系数下降 20%~25%,汽车的燃油耗可减少 8%~20%,采用其它措施都难达到如此好的效果^[2]。由于以上两个因素和汽车厂家追求利润的驱使,近十几年,关于汽车气动性能的研究进入了一个较成熟的阶段。

迄今为止,国内外汽车空气动力学的研究一般是用试验和理论相结合、以试验为主计算为辅的方法^[1,3]。试验主要是进行风洞试验,它是汽车空气动力学研究的主要手段。限于费用问题,目前大多用模型风洞试验。风洞试验结果精度高、可靠性好,对研究外部气流干扰件(后照镜、绕流板等)的气动作用大小比较有效,而这些干扰件则是数值计算模型简化的难题,它是发现和验证理论和计算方法的重要手段和基础^[4]。近年来,伴随着计算机的发展及计算技术的进步,数值研究取得了迅猛的发展。数值研究被称为计算流体力学 CFD(Computational Fluid Dynamics),它利用数值算法将流场的控制方程离散到一系列网格节点上求其离散的数值解^[5]。与试验研究相比,CFD 开发

的时间较短,所需经费较少。但是,数值模拟也存在一些缺点,如因没有完全搞清楚湍流等流态特性,对有些问题还没有普遍适用的数学模型,在数值计算上收敛性和精度也有待改进。当然,数值计算不能完全替代试验,试验对于校正 CFD 方法和检验 CFD 结果是非常必要的。

1 研究方法

汽车空气动力学属于低速空气动力学,即使考虑迎面来风的情况下作用于汽车上的相对空气流速也低于音速。假设汽车的最高车速为 250 km/h,马赫数也只有 0.20,这时的空气密度变化大约仅为 2%。因此,通常对于家用或商用轿车来说可不考虑气体的压缩性,将其简化为不可压流体处理。由于空气相对汽车作低速流动,空气的热传导系数很小,汽车对周围流场的热影响可忽略。另外空气的密度很小,在模拟汽车周围流场时,流场中空气的单位质量力可以忽略。由上得知,要想较好地对小轿车周围流场进行数值模拟,需要较精确地模拟汽车外形几何条件和把流场作为三维不可压缩粘性等温流场来处理^[1,3]。

为了避免汽车外部配件等对车身流场的干扰,平滑处理车体表面的局部凸凹,省略门把手、后照镜和局部筋条等等,并用光滑曲面板覆盖轿车底部,以确保底

* 收稿日期:2003-02-25

作者简介:陈景秋(1944-),男,贵州贵阳人,重庆大学教授,主要从事力学研究。

部气流无干扰通流。

1.1 汽车流场的基本方程

使用大型流场计算软件 PHOENICS 对面包车车身外流场进行模拟计算。以长安奥托 SC7081A 为例,当车速为 30 m/s 时,周围流场的雷诺数为 2.8×10^6 ,流场具有明显的湍流特征,本文中的湍流模型采用目前广泛应用的 $k-\epsilon$ 双方程模型,并忽略重力的影响。

从前面的讨论中得知,小轿车周围流场是个单相、定常、等温、不可压缩三维粘性流场。湍流流动连续性方程、动量方程、能量方程、以及湍流脉动动能和脉动动能耗散率方程都可以写成下列通用方程的形式:

$$\text{div}(\rho \bar{V} \Psi - \Gamma_{\Psi} \cdot \text{grad} \Psi) = q_{\Psi}$$

式中 $\Psi, \Gamma_{\Psi}, q_{\Psi}$ 分别取不同的量时表示不同的方程。

1.2 CAD 建模方法

由于汽车形状的复杂性,直接在 PHOENICS 中建模极为不便。PHOENICS 的前处理器提供了多种 CAD/CAE 的接口方式。本文采用现有的一些 CAD 商用软件,进行前期建模。将模型转换成 PHOENICS 可识别文件。

1.3 边界条件和网格划分

在 PHOENICS 中提供了两种网格的构造方式,非正交贴体网格和直角形网格(笛卡儿网格),但正交贴体网格畸变较大时可能会发生困难,所以 PHOENICS 提倡采用直角形网格(笛卡儿网格),并提供了网格局部加密功能与网格被边界切割的补偿功能(PARSOL)与之相配合。所谓 PARSOL 法就是对完全有形体阻塞的网格完全封闭,即不通流;对完全不被形体所占的网格则全通流;而对部分被形体所占的网格,则计算形体所占百分率,并以此确定通流百分比,然后根据 PARSOL 逼近实体外形^[4,6]。

PHOENICS 默认(不设任何边界条件):所有边界对流体不产生流入(出)、无摩擦、绝热,表现出对称面或轴的特征;PHOENICS 设置边界条件以源项的形式加入。

在计算完一个较大的计算区域后,可以根据流场的特点,缩小计算区域,并可适当地对局部网格进行加密处理,以期得到某部分流场更详细的流动特性。

在图 1 中, A 表示原点, A-E 方向为 X 轴方向, A-D 方向为 Y 轴方向 A-B 方向为 Z 轴方向。整个计算区域的长度为车身的 5 倍,入口 ABCD 距车首和出口 EFGH 距车尾都为车身的 2 倍;高为车高的 3 倍,宽为车宽的 5 倍,车的对称面在距 X-Y 面 2.5 倍车宽处。

入口条件为: X 方向速度为 35 m/s,其余方向速度



图 1 计算区域示意图

为 0;

出口条件为:定压,即和外界大气压相同。

1.4 模型验证

为了验证建模方法与数值计算的准确性,文中参照文献[7]、[8],对阶背式轿车进行了模拟计算,计算结果如图 2 所示。从图中可以看出,计算值与实验值在汽车的前部是重合且一致的,而在汽车顶部却出现了一些偏差。这可能是由于在计算中设定计算区域的上边界的速度为来流速度,即认为在上边界的扰动为零,而在实验风洞中,由于风洞壁面上不可避免地有速度滞止,这必将对汽车上表面的速度压力造成影响,从而造成计算值偏大的现象。尽管如此,还是能够从这条压力系数曲线走势中看出汽车车身的压力分布与实验是一致的,这说明数值计算对于汽车车形设计还是有指导意义的。对于下表面即汽车底部,由图可见,在车身前部计算值与实验值也能较好地保持一致。

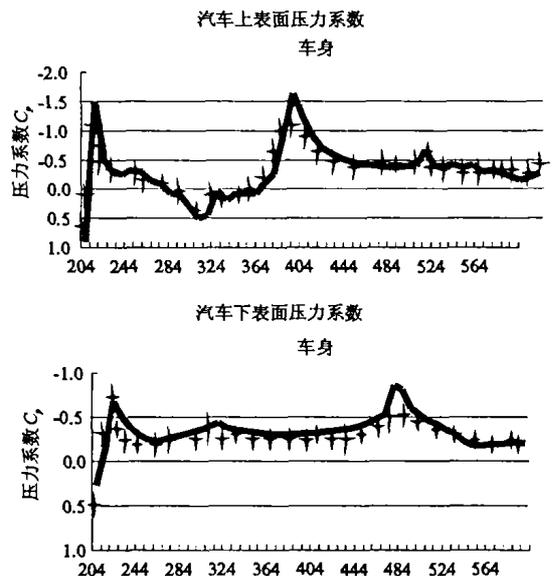


图 2 阶背式轿车压力系数(上、下表面)示意图 (实线为计算值,星号为文献[7]试验值)

2 计算与分析

在计算过程中, $120 \times 90 \times 90$ 的网格划分并运用 PARSOL 功能,在 Pentium® IV1.7 GHz, 512 M DDR 的计算机配置下运行了将近 27 h。完成计算后,在 VR-VIEWER 或 PHOTON 中显示计算结果,分析流场的速度、压力与湍流情况。图 3 是奥托轿车尾部区域纵

向对称面的速度矢量图。由图可见,在汽车的尾部有一段尾流区存在,在尾流区气流的流动是非常复杂的,这个区域内存在着大尺寸的漩涡。之后,在距离汽车一定距离处,气流出现了倒流现象,从这个位置开始,随着距离的增大,速度损耗越来越小,直到距离汽车很远处速度接近来流速度。从这个位置向前,是大面积的倒流区,速度变化很大,在这个区域存在着两个旋转方向相反的马蹄涡^[5],如图4所示:一个漩涡在上面,成顺时针旋转,另一个在下面,成逆时针旋转。由于这两个漩涡的存在,使汽车尾部的压力受到了很大的影响。在此区域出现倒流的原因是由于汽车尾部壁面边界层的流动,在行李箱盖末端处,突然失去了限制,进入了自由边界层。这样与汽车尾部的尾流区之间形成了剪切层而被卷吸。由于汽车的雷诺数很大,剪切层附近的混合作用,将尾流区内的流动卷吸到主流中去,同时在连续性流动的条件下,使下面的流体产生逆向流动。于是在汽车后部形成大尺度的漩涡,快速而大量的能量消耗就在此发生,从而使尾流的压强减小,引起了压差阻力。随着与汽车尾部距离的增大,大尺度的漩涡不断分裂,逆向流动区域变小,直到出现正向流动。

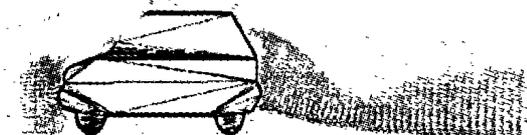


图3 长安奥托 SC7081A 速度矢量图(中性面)

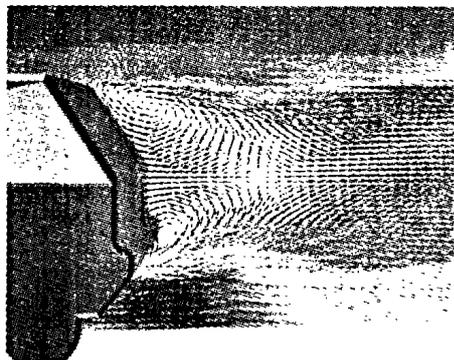


图4 长安奥托 SC7081A 尾部速度矢量图

在漩涡的中心,湍流动能很大,较大的能量就在此损失,从而引起了阻力。所以应该设法控制此区的流动,减少气流在此区的能量消耗,从而降低汽车的气动阻力。由于尾部气流的流动状况,使汽车尾部存在着较大的负压区。由于汽车前部是正压区,从而引起了

压差阻力。压差阻力占总阻力很大的比例,所以应该通过改型或添加附加装置来使汽车尾部的压力升高,从而降低汽车的气动阻力。

以上讨论的是汽车的纵向的气流的流动状况。图5是奥托 SC7081A 在四个横截面气流流动的速度矢量图。这四个截面距离汽车尾部的距离是不同的,其中第一个截面距离尾部最近,最后一个截面距离汽车尾部最远。在本次计算中,汽车尾部处于第70个网格。在第一个截面见图5(a),气流的流动情况比较紊乱,从第二个截面[图5(b)]开始,有一对旋转方向相反的漩涡形成,习惯上称为拖拽涡。它是由于底面的压力比侧面和顶面的压力都高,所以底面的气流向上流动与侧面的气流混合,侧面气流与来自汽车顶部的气流混合而形成的。到第三个截面[图5(c)]时拖拽涡已经发展得很好,形状已经很规则。随着距离的增大,此涡越来越弱[图5(d)],直到很远处,此涡消失。此涡消失的主要原因是由于涡在旋转过程中由于气体的粘性消耗,大的漩涡逐渐变成了许多很小的漩涡而被耗散。由于拖拽涡的形成,使汽车尾部的气流流动状况变得更加复杂,大尺度涡的形成使得气流耗散的能量增加,从而使汽车的阻力显著增大。因此,有必要采取措施减小涡的尺寸和强度,以达到减阻的目的。

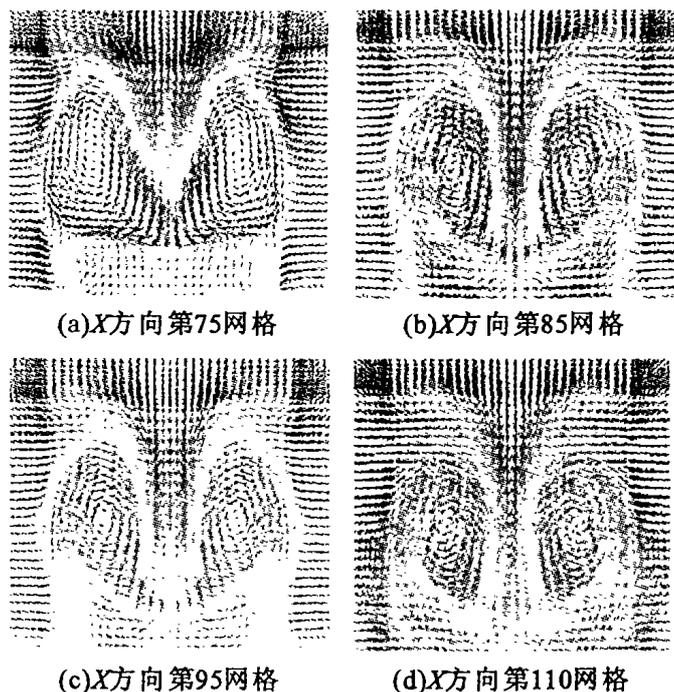


图5 奥托 SC7081A 尾部横截面速度矢量图

3 结 论

1) 运用 PHOENICS 软件,参照文献[7]、[8]对计算机模拟的精度进行了验证,模拟结果表明:模拟的表面压力系数 C_p 与文献的试验值相当接近,只是在汽

车顶部的前端出现了较为明显的误差。

2) 对长安奥托 SC7081A 进行了流态数值模拟, 与文献中的阶背式轿车的表面压力系数 C_p 曲线的走势几乎是相同的, 但由于车型的不同, 特别是在尾部, 奥托车的压力系数较大一些, 尾涡也较为强烈。

3) 提出的 CFD 与 CAD 相结合进行流场数值模拟的想法是可行的: 采用 PHOENICS 与 AutoCAD、3DSMAX 软件, 利用 CAD 软件强大的建模能力进行前处理, 进而转换成 CFD 软件可识别的文件格式输入, 在 CFD 软件中完成数值模拟与结果显示。

参考文献:

- [1] 傅立敏. 汽车空气动力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
[2] 杜广生. 汽车空气动力学[M]. 北京: 中国标准出版

社, 1999.

- [3] 杜子学. 微型面包车气动特性研究及气动造型优化设计方法探讨[D]. 成都: 西南交通大学, 2000.
[4] 姚征, 陈康民. CFD 通用软件概述[J]. 上海理工大学学报, 2002, 24(2): 137.
[5] 傅立敏. 汽车空气动力学数值计算[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2001.
[6] 郑春雷, 胡寿根, 陈康民. 理想轿车车身的三维数值计算与实验比较分析[J]. 上海理工大学学报, 2001, 23(2): 111.
[7] WILLIAMS J, QUINIAN W J, HACKETT J E. A Calibration of CFD for Automotive Shapes and CD[R]. SAE 940323, Society of Automotive Engineers February 1994.
[8] KOBAYASHI T, KITOH K. A Review of CFD Methods and Their Application to Automobile Aerodynamics[R], SAE 920338, Society of Automotive Engineers February 1992.

Numerical Simulation of the External Flow Around a Car Body

CHEN Jing-qiu, FAN Xue-feng, HU Han-fei

(Department of Engineering Mechanics, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: Using the PHOENICS software with CAD, the 3-dimensional airflow around a car is numerically simulated, the wake flow is discussed in detail. The results show that due to the complexity of the body shape and the interaction of the ground, the external flow is very complicated and shows well-developed turbulence. In the wake area, because of the appearance of flow separation and towing vortices, and the formation of the horseshoe vortices, the drag is in general increased.

Key words: automobile aerodynamics; CFD; PHOENICS; PARSOL

(编辑 张小强)