

doi: 10.7690/bgzdh.2015.07.008

# 某 SUV 气动特性仿真分析与试验研究

马金英, 付强, 潘作峰, 范士杰

(中国第一汽车股份有限公司技术中心, 长春 130011)

**摘要:** 针对风洞试验对汽车设计应用的限制, 提出采用 STAR-CCM+软件进行模拟计算。对某 SUV 的空气动力学模拟过程与对其进行的风洞试验验证进行详细的描述, 比较不同工况下的风阻系数结果, 研究不同风速和横摆角下的风阻系数。结果表明, CFD 数值仿真方法是可行、有效的, 可以大大减少风洞试验的费用, 缩短周期。

**关键词:** 空气动力学; 数值模拟; 风阻系数; 风洞试验

**中图分类号:** TP391.9 **文献标志码:** A

## Aerodynamic Drag Simulation and Validation of Certain SUV

Ma Jinying, Fu Qiang, Pan Zuofeng, Fan Shijie

(R&D Center, China FAW Co., Ltd., Changchun 130011, China)

**Abstract:** Use STAR-CCM+ software for CFD simulation is proposed in order to overcome the limitations of wind tunnel tests in the automotive design process. This paper presents the details of aerodynamic simulation process of a SUV and its validation with the experimental results available from the wind tunnel tests. The results are compared for different configurations. This study also includes the effect of different wind speeds and yaw angles on the coefficient of drag. The results show that CFD numerical simulation method is feasible and effective, can reduce the time and cost of wind tunnel tests.

**Keywords:** aerodynamic; numerical simulation; drag coefficient; wind tunnel test

### 0 引言

随着整车节能环保性及燃油经济性要求的提高, 几乎所有的发达与不发达国家都开始重视整车气动阻力的研究, 尤其是对无量纲系数  $C_d$ , 风阻系数的研究<sup>[1-2]</sup>。风阻系数值的获得主要有 2 种方法: 一种是进行风洞试验; 另一种是计算流体动力学 (computational fluid dynamics, CFD) 数值仿真。风洞试验结果一般可靠性较高, 但是由于它的一些局限性, 如成本高、周期长等缺点, 阻碍了它在汽车设计中的应用。

与风洞试验相反, CFD 数值仿真几乎克服了它所有的局限性。在车辆开发早期, 运用 CFD 数值仿真手段可以避免大量使用油泥模型进行风洞试验, 甚至在开发后期, 数值仿真仍然能够提供非常有价值的信息, 帮助尽量减少风洞试验次数。CFD 最主要的问题是精度不如风洞试验, 因此进行试验与仿真相关性研究是非常重要的。

文中采用 STAR-CCM+ (computational continuum mechanics) 计算流体力学软件对一款 SUV 不同风速和横摆角下的风阻进行模拟计算, 并

针对相应工况进行风洞试验, 系统研究了空气动力学数值模拟与风洞试验结果之间的差异, 为了解 CFD 仿真与试验之间的相关性, 进而提高 CFD 仿真的精度提供指导。

### 1 CFD 计算模型及方法

计算流体动力学 (computational fluid dynamics, CFD) 是通过计算机数值计算和图像显示, 对包含有流体流动和热传导等相交物理现象的系统所作的分析。现在不断发展的基于 CFD 的汽车空气动力学数值模拟成为重要的汽车空气动力学研究方法。通过这种数值模拟可以得到极其复杂问题的流场内各个位置上的基本物理量 (如温度、压力等) 的分布, 确定漩涡分布特性等<sup>[3]</sup>。

本次研究对象为一款两厢 SUV, 研究的工况模型如图 1 所示。



(a) 基础模型



(b) 基础模型+封闭进气格栅

收稿日期: 2015-03-01; 修回日期: 2015-04-06

作者简介: 马金英(1983—), 女, 黑龙江人, 硕士, 工程师, 从事汽车空气动力学研究。

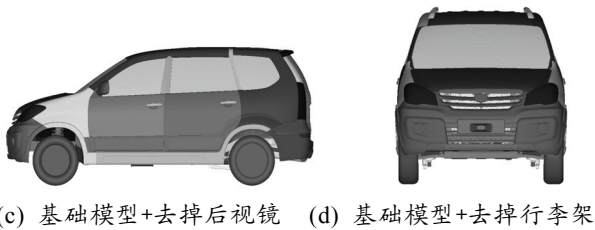


图 1 研究工况

### 1.1 网格划分

面网格划分采用 Hyper Mesh 软件。车身表面网格要能细致地捕捉实车特征同时形成用于流体计算的区域。为此，除了对车身造型外表面进行细致的网格划分外，对底盘及发动机舱内部件也细致划分。

整车 CFD 仿真模型如图 2。由图 2(a)可见车身特征明显。格栅本身几何尺寸较小，故采用小尺寸网格，图 2(b)显示格栅处网格与其周围部件的大尺寸网格较好过渡。结合精度要求，尽量保留了底部细节，车身横纵梁和底盘的凸起凹坑，以及一些分布于底部的构件，主要有油箱、排气管、备胎和后桥等都进行了详细的网格划分，并适当简化，见图 2(c)。发动机舱内部由于部件很多，处理较为繁琐。保留了主要板件如前围板、翼子板和防撞梁等主要的结构件，见图 2(d)。总之，精细的面网格划分保证模型接近实车状态，确保 CFD 模拟的准确性。

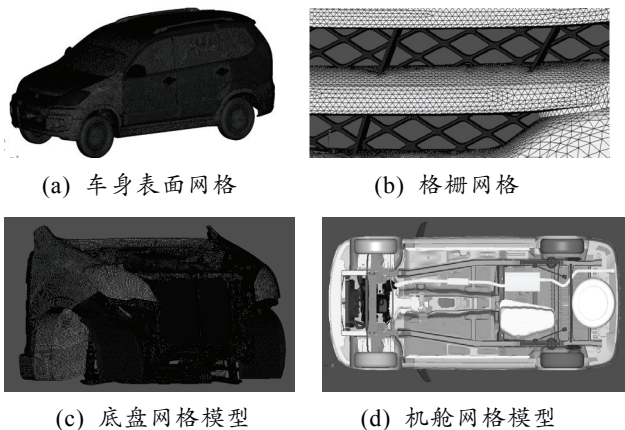


图 2 面网格

### 1.2 求解设置

STAR-CCM+软件是西迪阿特 (CD-adapco) 公司采用最先进的连续介质力学数值技术 (computational continuum mechanics algorithms) 开发的新一代 CFD 软件，拥有出色的性能、精度和高可靠性。

文中应用 STAR-CCM+进行体网格生成及计算

设置。在车的外部建立一长方体空腔计算区域，模拟汽车周围空气的流动区域。外部计算域尺寸：长 34 000 mm，宽 20 000 mm，高 18 000 mm。

为了捕获靠近车表面物理量的梯度变化，在车附近划分了 5 层单元，采用高 Re 数近壁函数， $y^+$  在 30~300 之间，定义第一层网格厚度为 1 mm。图 3 为体网格截面示意图。从车表面精细的网格到外部区域较粗的网格，采取了逐渐过渡的划分方法。



图 3 体网格 Y=0 截面示意图

采用计算流体力学软件 STAR-CCM+进行 CFD 计算。给定流场入口为速度入口，出口为压力出口，具体边界条件设定如下：

速度入口：根据工况设定进口速度值；

压力出口： $p_0=101\ 325\ \text{Pa}$ ， $\text{Gradient}=0$ ；

汽车表面：壁面条件，采用系统默认值；车身表面设为固壁无滑移条件，地面以进口速度移动，其余流场壁面为滑移条件。

考虑发动机舱内部阻力，机舱内部散热元件采用多孔介质模型。介质阻力系数由试验数据拟合获得。

汽车空气动力学属于低速空气动力学，汽车周围流场可看作是三维不可压缩粘性等温流场<sup>[4]</sup>。考虑涡流因素影响和低雷诺数效应，采用 Realizable  $k-\epsilon$  湍流模型，此模型已被有效地用于各种不同类型的流动模拟<sup>[5]</sup>，Realizable  $k-\epsilon$  湍流模型引入了与旋转和曲率有关的内容，在轿车外流场计算中具有较好的收敛性和精确性<sup>[6]</sup>。

## 2 风洞试验方法

本次试验在上海同济大学地面交通工具风洞中心空气动力学/声学风洞(AAWT)进行。试验段长度 22 m，风洞喷口面积 27 m<sup>2</sup>，最大风速 250 km/h，背景噪声 61.5 dBA (160 km/h)。试验车辆正投影面积为 2.586 m<sup>2</sup>，对应阻塞比为 9.6%。

试验车无牌照，空调关闭，设定为内循环模式，风挡雨刮器处于收起位置，车外后视镜处于正常行驶位置。试验风速设定介于 80~180 km/h 间，步长 20 km/h。试验车在风洞现场安装后的照片见图 4。



图 4 试验车辆安装后状态

根据汽车风洞的标准试验工况,进行雷诺扫掠,并运行五带系统。风洞运行基本状态:中央移动带  $CB=1$ , 车轮转动单元  $WSU=1$ , 水平边界层抽吸  $SC=open$ , 试验段地板抽吸  $TS=covered$ , 转盘地板抽吸  $TT=covered$ 。对试验车进行了整车空气动力学性能测试,得到不同车速、不同横摆角及不同测试工况下的气动力、气动力系数和表面压力。试验结果将同后面的 CFD 结果一同给出。

### 3 结果与分析

#### 3.1 基础模型表面压力分布

图 5 为基础模型车身表面压力分布,图 6 为基础模型  $Y=0$  纵向对称面压力系数分布。从图中可以看出,前保险杠格栅处有一驻点 ( $C_p=1.03$ ),经过驻点流动被加速,流向发动机罩盖,由于气流的加速,  $C_p$  值降低。但很快又受到挡风玻璃的阻挡形成一个小的阻滞区,在阻滞区内  $C_p$  值增加。当气流经过前风窗,重新被加速,经过车顶到达顶盖后缘与后窗前缘的时候,开始减速,并发生了分离现象,  $C_p$  为负值,形成压差阻力。

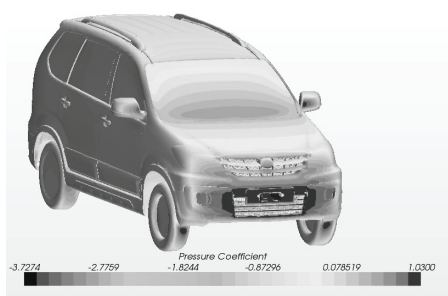


图 5 基础模型车身表面压力分布

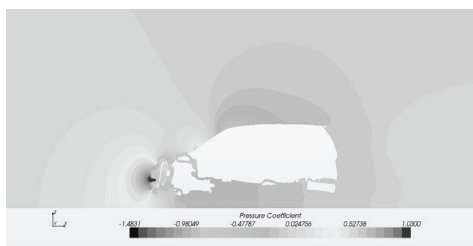


图 6 基础模型  $Y=0$  纵向对称面压力系数分布

可以看到基础模型在驻点位置总压计算值过高,这是由于  $k-\epsilon$  湍流模型各向同性的性质使得在靠近驻点位置湍流模拟过剩。在驻点位置的压力及基准压力的过高估计将导致整车阻力计算值降低  $0.01\sim 0.02^{[7]}$ 。

#### 3.2 不同工况下的阻力系数

表 1 为在  $0^\circ$  横摆角, 风速  $100\text{ km/h}$  下试验与 CFD 计算的风阻系数值(相对值)之间的对比。

表 1 不同工况下风阻系数值

工况	Cd(Wind Tunnel)	Cd(CFD)	$\Delta Cd$
① 基础模型	a	1.05a	5%
② 基础模型+封闭进气格栅	0.943a	0.987a	4.7%
③ 基础模型+加装下护板	0.977a	1.025a	4.9%
④ 基础模型+去掉后视镜	0.975a	1.025a	5.1%
⑤ 基础模型+去掉行李架	N/A	1.03a	N/A

从表中可以看到:试验值与计算值有很好的—致性,各种工况相对误差都在 5%左右。从工况②可以看出:根据试验值冷却气流的阻力贡献量在 5.7%,可以说减小冷却气流进气面积可以较为直接且明显地减小气动阻力,但冷却气流进气面积的减小量应与车辆热管理相协调,保证发动机冷却水及冷凝器的散热量。工况③加装下护板相对于不带下护板状态根据风洞试验可使风阻降低约 2.3%,可见下护板对降低风阻有一定的作用。工况④去掉后视镜改变了 A 柱及前车窗周围气流,根据风洞试验风阻系数减小 2.5%。工况⑤去掉行李架改变了车顶流动分布,根据 CFD 计算风阻系数减小 2%。

表 2 为风洞试验与 CFD 仿真计算风阻增量之间的对比。可以看到各增量之间有很好的—致性。

表 2 不同工况下风阻增量变化

工况	$\Delta Cd$ (Wind Tunnel)	$\Delta Cd$ (CFD)	差值
封闭进气格栅	-0.057a	-0.063a	-0.006a
加装下护板	0.023a	0.025a	0.002a
去掉后视镜	0.025a	0.025a	0

#### 3.3 不同风速下的阻力系数

图 7 为不同风速下的风阻系数变化。试验风速设定介于  $80\sim 160\text{ km/h}$  之间,步长  $20\text{ km/h}$ 。

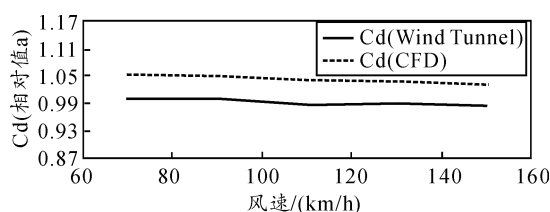


图 7 风阻系数随风速的变化



从图中可以看到：每辆车的阻力系数随车速变化的趋势，总体来看，在对应的车速范围内，阻力系数的减小在 1~5 count 之间，呈递减趋势。对应于基准风速 120 km/h(中国高速公路限定速度)来看，阻力系数在试验风速范围内对雷诺数不敏感。同时进行对应风速下的 CFD 计算，计算结果也显示在所列车速范围内 Cd 值变化很小。

### 3.4 不同横摆角下的阻力系数

图 8 为阻力系数随横摆角的变化。风洞试验中横摆角为 0°、10°、20°，风速为 100 km/h。

从图中可以看到，随着横摆角的增大，Cd 值大幅度增加，这是因为横摆角状态，模型靠近侧壁使得阻塞比增加。

图 9 为总压系数为 0 的等值面。颜色渲染为湍

动能。对于横摆角为 0°、10°，流动从挡泥板、A 柱、后视镜和车顶后缘处分离。因为横摆角改变了对称的尾流结构，一部分附着在迎风面上，流动在背风面分离明显。从后视镜及 A 柱分离的涡在车后拖拽很长距离，使得背风面尾流的强度增加。随着横摆角的进一步增加，流动分离有在 B 柱和顶盖的交接位置发生的趋势。

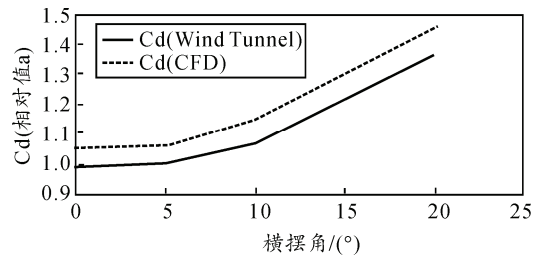


图 8 风阻系数随横摆角的变化

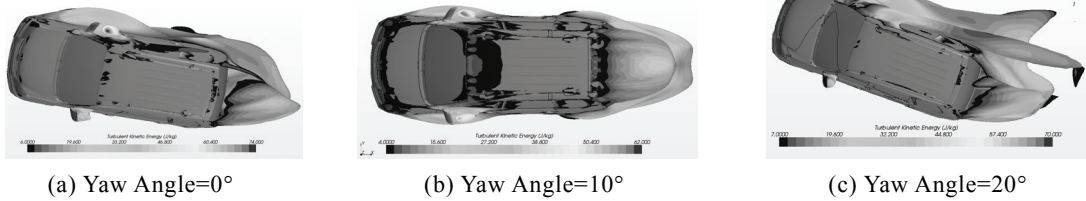


图 9 Total pressure coefficient=0 等值面

## 4 结论

在上海同济大学地面交通工具风洞中心，笔者进行了一辆 SUV 实车的风洞试验，对应的工况进行了 CFD 仿真计算，系统地分析研究了仿真计算与风洞试验之间的相关性，主要结论有：

- 1) CFD 仿真计算的 Cd 值与试验值有很好的—致性，对于研究工况误差在 5%左右。
  - 2) CFD 仿真计算得到的风阻增量与试验结果吻合很好，从车辆开发的角度来讲这种结果是非常有利的。
  - 3) 在风洞可实现的整个风速范围内，雷诺数对 Cd 值的影响非常小。
  - 4) 对于横摆角从 0°~20°，CFD 仿真计算值与风洞试验值有很好的—致性。从试验及 CFD 仿真计算都可看出横摆角在 0°~5°之间，Cd 值变化不大。
- 从以上研究来看：采用文中的 CFD 仿真计算方法得到的风阻增量与试验结果吻合很好，但是 CFD 计算的绝对值结果与风洞试验还存在一定误差，对

于如何进一步提高 CFD 仿真计算的精度还需进行更多的研究工作。

### 参考文献：

- [1] Hucho W. H. Aerodynamics of Road Vehicle From Fluid Mechanics to Vehicle Engineering Fourth Edition[M]. USA: SAE Order No. R-177, 1998.
- [2] Howell J, Sherwin C, Passmore M, et al. Aerodynamic Drag of a Compact SUV as Measured On-Road and in the Wind Tunnel[J]. SAE Technical Paper 2002-01-0529, 2002.
- [3] 张英朝. 汽车空气动力学数值模拟技术[M]. 北京: 北京大学出版社, 2011: 47-54.
- [4] 谷正气. 汽车空气动力学[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005: 80-115.
- [5] 王福军. 计算流体动力学分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 113-132.
- [6] 梁建永, 梁军, 范士杰, 等. 轿车外流场 CFD 分析中常用 k-ε 湍流模型的对比[J]. 汽车工程, 2008, 30(10): 847-852.
- [7] Axelsson N, Ramnefors M, Gustafson R. Accuracy in Computational Aerodynamics-Part 1: Stagnation Pressure[J]. SAE Technical Paper 980037, 1998.