

# 乘用车尾涡特性研究

## The Research on Trailing Vortex Applied in a Passenger Car

郭军朝, 王伟民, 王小碧  
(东风汽车公司技术中心, 武汉, 430056)

**摘要** 本论文以东风汽车自主品牌乘用车某车型为算例,对乘用车外流场运用 CFD 软件 STARCCM+3.06 进行仿真计算,对其相关流动信息也进行了详细的描述和剖析。通过与试验结果比较,确认计算结果是可信的。同时,本文详细阐释了车身尾涡产生的机理,描述了湍流尾涡由产生到消亡的渐变历程,对今后乘用车造型气动特性分析有着重要意义。

**关键词**: 外流场、CFD、尾涡

**Abstract**: An external flow analysis of a self\_owened brand vehicle of DFM is considered as an analysis example in this paper. And an external fluid field around a passenger car has been simulated and some other related information has also investigated. The simulated results have a high credibility from the comparison between experimental results and analytical results. The principles of tail vortex and the process of generation and disappearance are represented simultaneously. And this plays an important role in the passenger vehicle styling of self\_owened brand vehicle of DFM.

**Keywords**: External fluid field、CFD、Tailing vortex

### 1 引言

空气动力学作为流体力学的一个分支,是研究运动物体在与周围空气作相对运动时两者之间相互作用力的关系及规律的科学。自二十世纪起始,空气动力学研究成果多应用于航空航天及气象领域。亚/超音速空气动力学的运用为路面机动车辆的气动力学研究提供基础。因为汽车运动的特殊环境及其涉及到气动理论的特殊性,进一步的研究表明,汽车空气动力学已逐步发展成为空气动力学的一个独立分支。它在指导车身造型与设计、分析发动机舱热管理、探索乘员舱气动特性等诸多方面起了极大的应用。

研究汽车外部绕流气动特性的方法有物理风洞试验法、数值风洞仿真法、气动理论分析法。传统的物理风洞试验方法试验周期长、成本较高,高达几十万元;现代的数值风洞仿真法可以节省试验成本、缩短产品开发周期,更有利于优化车身造型;气动理论分析贯穿于物理风洞试验和数值风洞仿真分析的过程中。三者相辅相成,在分析运动汽车外部气动特性的过程中是统一的。

随着社会的快速发展、可再生资源的减少、人们的生活节奏也越来越快,这使得汽车以较高的车速行驶。汽车高速行驶时所受到的气动阻力与车速呈非线性关系,而所受的滚动阻力与车速基本呈一次线性关系。也就是说,汽车高速行驶时,燃油或电能决大部分消耗在克服空气所施加的阻力上。

在汽车开发前期阶段,汽车空气动力学的研究主要是分析与车身A面空气绕流所产生的六分力,即纵向阻力、垂向升力、侧向力、横摆力矩、纵倾气动力矩、侧倾气动力矩共六个气动特性参数<sup>[1]</sup>。车身造型师和流体工程师主要关注的是对汽车动力性、燃油经济性有着重要影响的纵向阻力和升力,希望造型具备理想的低阻特性、驱动轮受到一定的负升力。因为来流风速均小于0.3倍声速,同时封闭进气格栅且没有考虑空气与车身表面及机舱内部热交换的存在,认为车身外流场具有粘性、不可压、等温的特性<sup>[2]</sup>。

本文就是以东风汽车公司某自主品牌乘用车为算例运用流体仿真软件STARCCM+3.06说明了空气动力学在乘用车开发前期造型阶段中的应用。

## 2 乘用车外部绕流数值仿真建模

### 2.1 计算域的离散化

根据空气动力学原理,把汽车周围的无限空间视为计算域是不现实的,也是没有必要的。在不影响流场品质的前提下,通常的数值风洞仿真分析选取有限的三维空间作为计算区域。计算域的离散化,即将计算域分割为网格,以网格上离散的值来近似空间上连续的值,每一个解析网格即一个控制体积。因为多面体网格有诸多优点:多面体网格的收敛性更优于四面体网格;只需要很少的迭代步数,阻力系数 $C_d$ 和升力系数 $C_l$ 值便可达到比较稳定的收敛数值;多面体模型对网格数量的依赖性比四面体小,多面体模型只需要四面体网格数的1/4,但计算精度相当。因此,选择多面体网格生成器进行空间离散<sup>[3]</sup>。

在风洞阻塞比小于7%,不影响洞内流场品质的前提下,可以构建计算域。本算例的计算域的大小为6倍车长 $\times$ 3倍车宽 $\times$ 3倍车高,即 $(6 \times 4.5) \times (3 \times 1.6) \times (3 \times 1.4) = 27\text{m} \times 4.8\text{m} \times 4.2\text{m}$ ;本算例以车身外形的一半为研究对象,计算得出数值风洞阻塞比为:汽车正面最大迎风面积的一半/计算域入口面积 $=1.07/20.16=0.05 < 7\%$ 。

本算例所示的某车型外流场仿真计算域和边界的确定如图2所示,包含附面层在内的多面体网格数是120万。

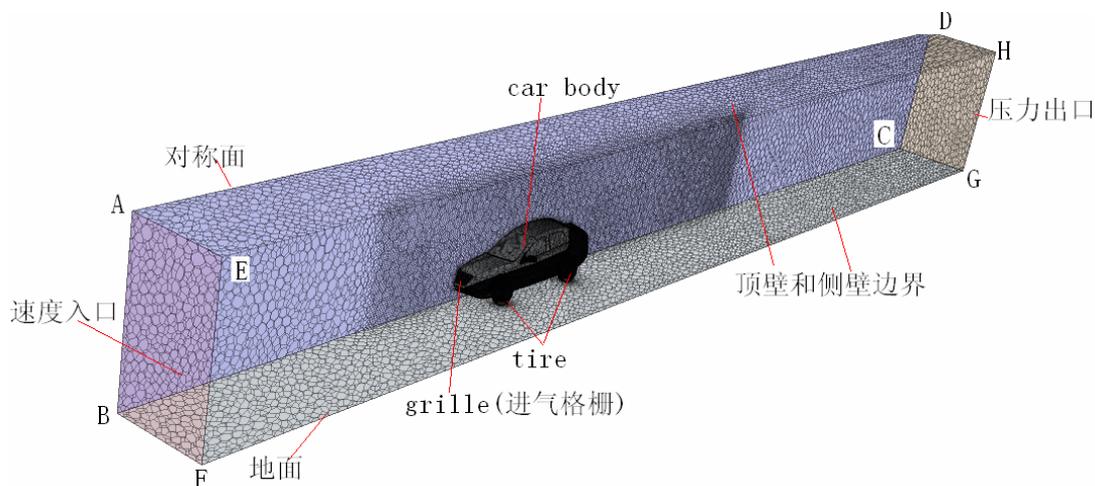


图2 内置1/2轿车模型的数值风洞

表 1 数值风洞边界位置及说明

计算域边界位置	边界类型	说明
面 ABFE	速度入口	不考虑附面层空气粘性的影响
面 CDHG	压力出口	不考虑附面层空气粘性的影响
面 ABCD	对称面	不考虑附面层空气粘性的影响
面 BCGF	地面	考虑附面层空气粘性的影响
面 ADHE+面 EFGH	远场壁面	不考虑附面层空气粘性的影响
Carbody	壁面	考虑附面层空气粘性的影响
grille	壁面	封闭前脸进气格栅, 不考虑内流阻力
tire	壁面	考虑附面层空气粘性的影响

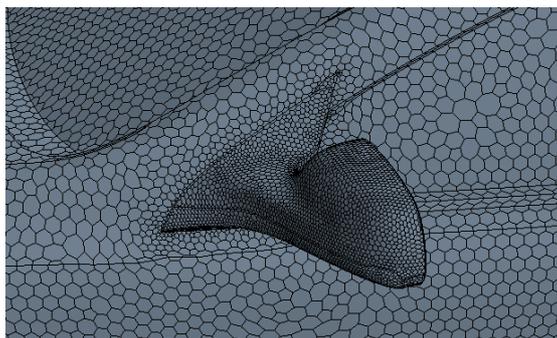


图 3 后视镜网格局部加密

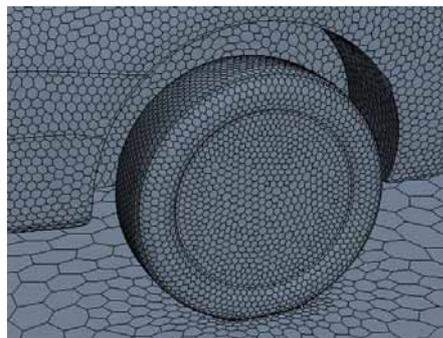


图 4 轮胎与地面连接区域处理的网格

## 2.2 连续介质的定义

物理模型的选择主要是流体介质空气属性的定义、稳态与瞬态、湍流模式等的选择。本算例所示参数如表 2 所示。

表 2 连续介质的定义

相关参数项	参数值
Material (连续介质)	Gas (空气)
Motion (计算域)	Stationary (计算域静止)
Flow (流体域求解格式)	Segregated flow (分离式求解)
Equation of state (状态方程)	空气温度 15 度, 1.225 kg/m <sup>3</sup>
Time (时间)	Steady (稳态)
Viscous regime (粘性机理)	Turbulent (湍流)
Turbulence (湍流模式)	$\kappa - \epsilon$ turbulence ( $\kappa - \epsilon$ 湍流模式)

## 2.3 边界条件

边界条件是指在求解域的边界上所求解的变量或其一阶导数随地点及时间变化的规律, 是使方程问题有定解的必要条件。边界条件与初始条件是控制方程 (质量守恒方程、动量守恒方程、能量守恒方程) 有定解的前提, 控制方程、相应的初始条件、边界条件及湍流模式的组合构成了一个封闭的偏微分方程组。

初始条件是所分析对象在过程开始时刻各个求解变量的空间分布情况。对于稳态问题, 不必给定初始条件; 对于瞬态问题, 必须给定初始条件。本算例的边界条件设置如表 3 所示, 其中湍流特

征长度为轴距的 0.07 倍, 本算例的湍流特征长度为  $0.07 \times 2.6$ , 即 0.18m。

表 3 外流场边界条件的定义

边界名称	边界类型	物理条件
car_body 车身	Wall	Wall (no slip, 考虑粘性的影响)
grille(格栅)	Wall	Wall (no slip, 考虑粘性的影响)
Tire (轮胎)	Wall	Wall (no slip, 考虑粘性的影响)
rear_mirror 后视镜	Wall	Wall (no slip, 考虑粘性的影响)
Symm_plane 对称面	Symmetry	Symmetry plane (纵向对称中面)
Ground 地面	Wall	Wall (X 方向速度 30m/s, 消除边界层影响)
Inlet 入口	Velocity inlet	速度大小 30m/s(湍流: $I=0.01$ , $l=0.18m$ )
Outlet 出口	Pressure outlet	表压为 0(湍流: $I=0.01$ , $l=0.18m$ )
顶部和侧壁	Wall	Wall (Slip, 滑移壁面)

## 2.4 求解器的定义

软件 Starccm+3.06 作为 CFD 领域的主流软件, 其对空间离散的内核是有限体积法。有限体积的基本思路是将计算区域化分为网格, 并使每个网格点周围有一个互不重复的控制体积; 将待解微分方程(控制方程)对每个控制体积积分, 从而得出一组离散方程。其中的未知数是网格节点上的因变量  $\Phi$ 。为了求出控制体积的积分, 必须假定  $\Phi$  值在网格点之间的变化规律。从积分区域的选取方法角度分析, 有限体积法是加权余量法中的子域法; 从未知解的近似方法角度分析, 有限体积法是属于采用局部近似的离散放法。离散方程的物理意义是因变量  $\Phi$  在有限大小的控制体积中的守恒原理, 如同微分方程表示因变量在无限小的控制体积中的守恒原理一样。

稳态问题可以采用显示时间推进积分。显示积分编程简单, 占用内存小, 但其具有一阶精度, 而且时间步长的大小受到限制。针对非稳态问题, 选择隐式非稳态求解器, 隐式时间推进格式的收敛与否与所定义的时间步长无关, 在求解瞬态问题过程中理论上内部虚拟时间步长可以取任意值, 因为其无论采用多大的时间步长, 都不会出现解的振荡。本算例采用分离式求解器, 其速度、压力、湍流模式的欠松弛因子分别是 0.6, 0.3, 0.8。离散化后的控制体积质量、动量、能量守恒方程的偏微分方程为线性代数方程, 运用高斯—赛德尔迭代方法进行迭代求解; 迭代步数为 1600 步; 运用服务器 4 个 CPU 求解耗时约 10 个小时。

## 3 乘用车外部绕流特性仿真数据处理

### 3.1 风阻系数的预测以及与试验结果的比较

在车身侧偏角  $\beta$  为  $0^\circ$ 、空气来流 30m/s (即 108km/h) 时, 实车物理风洞试验、详细模型及简化仿真三种分析方式下的乘用车外部绕流风阻特性如表 4 所示, 考虑机舱内流与实际地板形状的实车物理风洞试验和详细仿真分析所得出的风阻系数相同<sup>[5]</sup>。

但是实车物理风洞试验的试验成本较大, 详细仿真分析所需的计算网格数量较高建模工时长, 二者只适用于乘用车开发的中后期阶段。而车身底板光滑简化处理的简化外流场仿真分析的风阻系数为 0.28, 加上修正值 0.05 近似与实车物理风洞试验结果相同, 能预测实车的风阻系数<sup>[6]</sup>。简化仿真分析可以节省试验成本, 适用于车型开发前期造型与车型选型阶段。

表 4 多种分析类型下乘用车风阻特性比较

车型	分析类型	风阻系数
某型轿车	实车物理风洞试验（考虑机舱内流和实际地板形状）	0.330
	详细模型仿真分析（考虑机舱内流和实际地板形状）	0.325
	简化仿真分析（不考虑机舱内流，车身底板光滑处理）	0.280

### 3.2 流场纵向对称面特性分析

观察图 7 可得，下卷旋涡是由于顶部高速气流进入汽车尾部时，尾部的负压吸引所致；上卷旋涡是由于汽车底部压强较尾部高的多，在进入尾流区时急速流入所致。下卷旋涡影响区域比上卷旋涡小，两个涡旋旋向相反，相互影响，随着离开车体距离的增大而逐渐减弱。由于涡旋的旋转和相互之间的摩擦要消耗大量的气流能量，使得尾流呈现较强的负压，这一负压区是汽车压差阻力的重要来源。

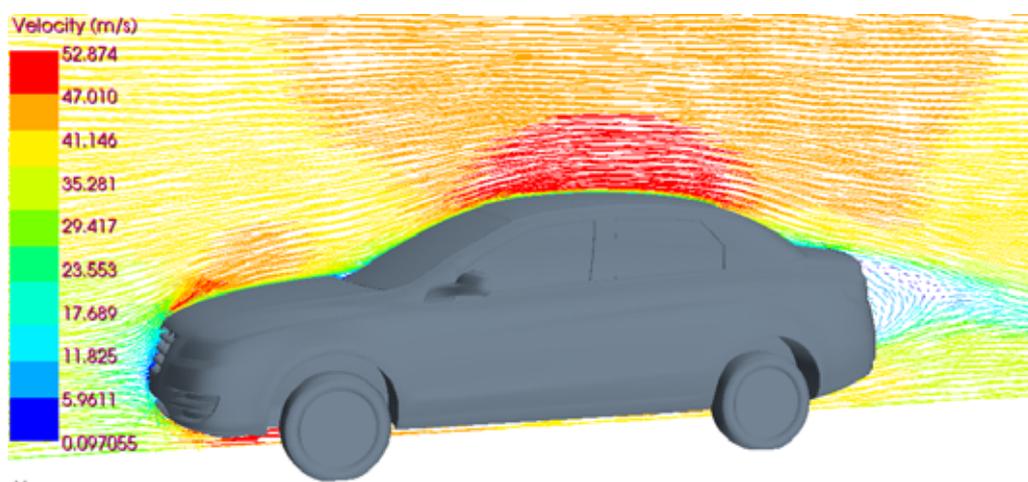


图 6 纵向对称面速度矢量云图及湍流涡示意图

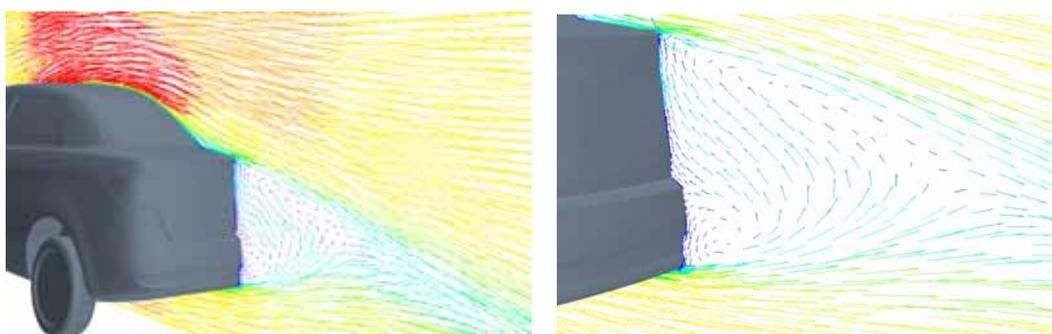


图 7 车身尾部的湍流涡

### 3.3 车身尾涡湍流动能比较

湍流动能是某一点的速度脉动的表征，此值越大说明此处的流动状况随时间的不稳定越大。分析图 8-10 可得，汽车尾部存在一定程度的湍流，是由许多尺寸不同的、杂乱堆集着的漩涡形成的；较大的旋涡不断破裂成为更小的旋涡，能量也就逐级传递给越来越小的旋涡；在旋涡尺度足够小时，粘性已经可以耗散掉它所得到的湍流动能而转化为热能；从截面 1 到截面 4，车身尾部的湍流动能最大值依次为 43.936、89.7、47.25、28.8，即尾部的湍流有一个从产生，到逐步发展到最大，再转而

减小直至耗散的一个过程；尾部产生的湍流使得压力减小，而车身前部压力又占主导优势，故产生压差阻力；尾部气动分析与美学造型的联合分析对减少风阻是至关重要的<sup>[7]</sup>。

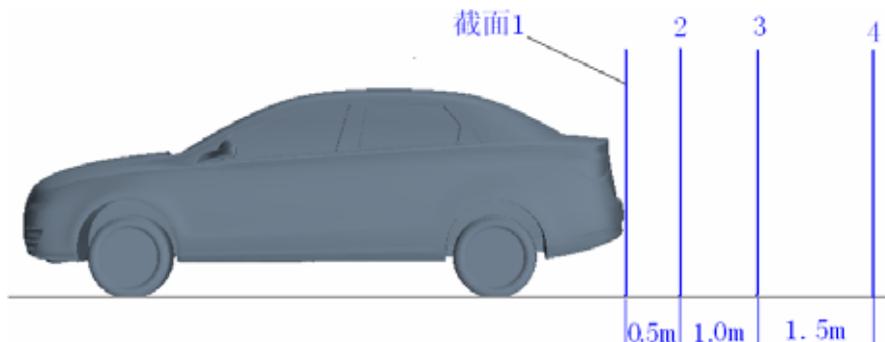


图8 车身后部多个切片位置示意图

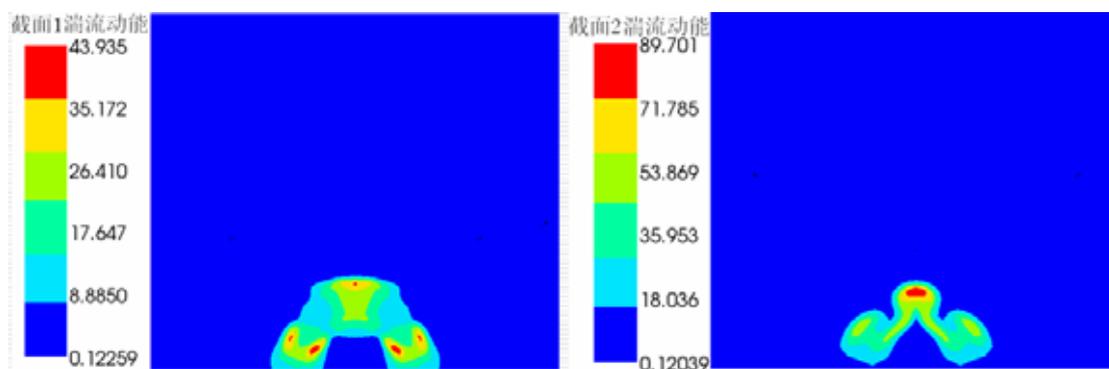


图9 截面1和截面2湍流动能比较

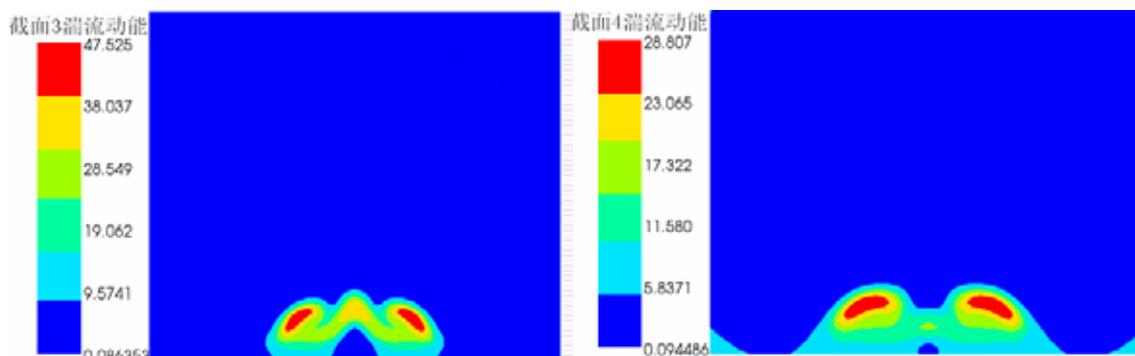


图10 截面3和截面4湍流动能比较

## 4 结论

运用计算流体动力学技术深入研究车身尾部的湍流产生机理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) 简化仿真分析车身外流场所得风阻系数 0.28，表明该乘用车造型是比较理想的；
- 2) 车身尾部存在一对不是很明显的湍流涡，有利地降低了车身后部的压差阻力；
- 3) 车身外部绕流的尾部湍流尾涡存在着一个由产生、发展、消亡的一个过程；
- 4) 在车型开发的早期阶段通过运用流体工具仿真分析外流场特性进行车身的造型或选型，对车身地板进行简化处理是可行的。

## 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] 傅德熏, 马延文编著. 计算流体力学. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- [3] STAR-CCM+3.06 User's Guide.
- [4] 陶文栓著, 数值传热学. 西安交通大学出版社, 1998.
- [5] 轿车风洞试验报告. 2007 年.
- [6] 汽车工程手册(试验篇). 人民交通出版社, 2001.
- [7] 黄向东. 汽车空气动力学与汽车造型. 人民交通出版社, 2000 年.