

基于 STAR-CCM+对厢式货车外流场的大涡模拟

Numerical Simulation and Analysis of Van Truck External Flow based on large eddy simulation by STAR-CCM+

唐继响

(湖南大学 汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 长沙 410082)

摘要：运用流体力学 STAR-CCM+分析软件，采用了大涡模拟的基本思想，对某种厢式货车外流场进行了数值模拟，计算出了压力分布和速度流线图。根据模拟出的流线对某些细节提出了一些建议，从而减小了货车的阻力系数，已达到优化货车外形，同时在货车外形设计方面提供了参考。

关键词： STAR-CCM+，厢式货车，数值模拟，外流场，大涡模拟

Abstract: Based on large eddy simulation ,A research on numerical simulation of external flow of van truck is conducted.By using analysis software of fluid mechanics STAR-CCM+, The pressure distribution and velocity flow chart are calculated. According to these chart, some Suggestions were put forward in order to reduce drag coefficient and improve the Van Truck shape which can also provides a reference in van shape design.

Key words: STAR-CCM+, Van Truck, Numerical Simulation, Outflow field, large eddy simulation

引言：目前，在车辆外流场的模拟有理论计算、风洞试验和数值仿真模拟三种方法。对于理论计算，由于车辆外部湍流的复杂性，使得计算困难，有时根本无法求解，因而普遍采用后两种。对于风洞试验本身存在许多不足，诸如试验周期长、成本高以及设备庞大等，使得在产品初期阶段投资相当大。随着计算机技术的发展，计算机处理速度在不断的提高，使得数值模拟凸显出它的巨大优势，面对风洞试验的这些缺陷，数值模拟可以很好的克服，同时通过求解流体力学方程就可获得比通常风洞实验更多的信息，并且在计算机模拟不致受风洞那样的限制，计算机则可将计算空间做得很大的，消除了洞壁干扰和风洞实验段的阻塞效应。

1大涡模拟理论

目前湍流的数值模拟方法大致分为 直接模拟法 (DNS)、雷诺时均方程法 (RANS)、大涡模拟法 (LES)三类。大涡模拟是介于直接模拟法与雷诺时均平均法之间的一种湍流数值模拟方法。在大涡模拟中,流动的大尺度涡运动进行直接求解,小尺度涡通过亚格子模式进行模拟,要实现这种方法,有两个重要步骤必须完成,首先是建立一种数学滤波函数,从湍流瞬时运动中将尺度比滤波函数尺度小的涡滤掉,从而分解出描述大涡模拟场的运动方程,目前,常用的滤波函数有:(1) Deardorff 的盒式滤波函数;(2)傅里叶截断滤波函数;(3) 高斯型滤波函数。其次,是压格子尺度模型的建立,建立合理的亚格子尺度模型是大涡模拟方法的关键问题。通常亚格子尺度模型可以分为三类 涡粘性模型、相似性模型、混合模型。大涡模拟在计算时间和计算费用方面是优于直接数值模拟的,在信息完整性方面优于雷诺平均模型,缺点是计算时间还是比较长,随着计算机处理能力的提高,这个缺点逐步被克服,本文就是基于以上这些思想对货车进行外流场数值的模拟。

2模型的建立

此次研究所用到的模型为 Ahmed钝体和所研究的厢式货车。由于本次研究对货车做风洞实验比较难,而且没有标准的数据可参考对比,因而就借助于对固定形状的钝体先做相应的数值模拟,来验证基于 STAR-CCM分析软件采用大涡模拟的正确性。Ahmed钝头体的三维图及数据如图 1

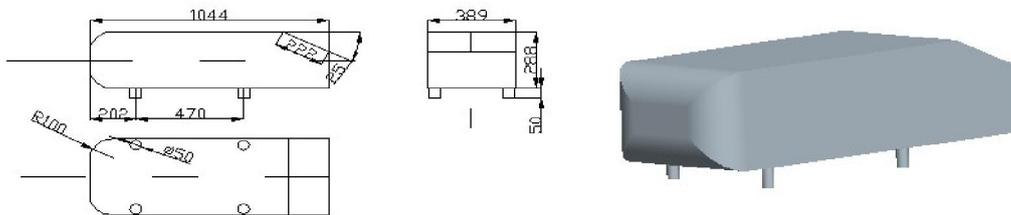


图 1Ahmed钝体

货车的三维图及数据如图 2

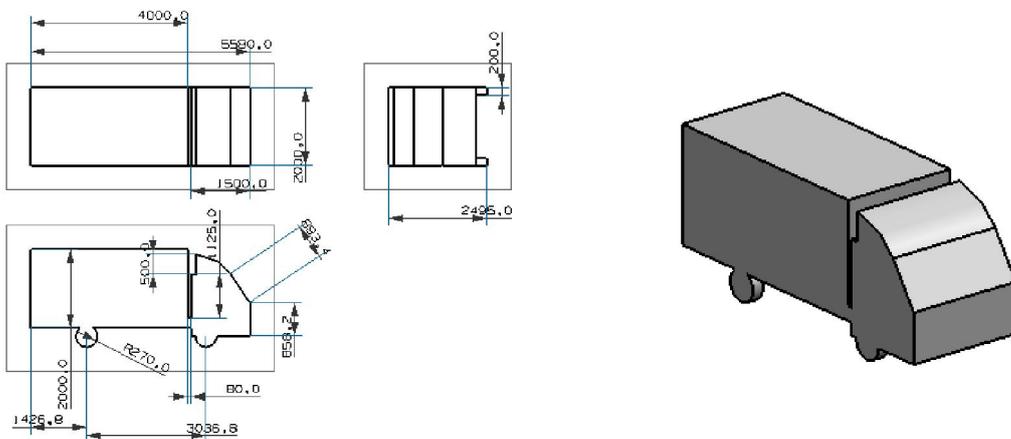


图 2货车相关数据和三维图

3 Ahmed 钝体外流场模拟验证

对 Ahmed 钝体做外流场模拟之前，首先要对 Ahmed 钝体做相应的计算域，同时要生成相应的体网格。对于计算域的建立，为了减少建立的壁面对模拟造成的影响，计算区域 Ahmed 钝体的前方设置为 5 倍的 Ahmed 钝体长，上方为 5 倍 Ahmed 钝体高，侧面为 5 倍 Ahmed 钝体宽，后方为 10 倍 Ahmed 钝体长。网格划分采用 Trimmer，建立的网格模型如图 3，生成 145 万网格。

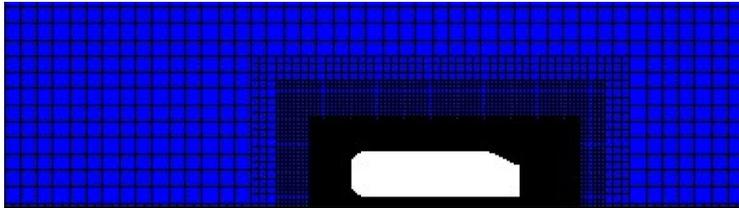


图 3 Ahmed钝体体网格

Ahmed 钝体模型模拟的外流场能够产生除转动车轮、发动机机舱及乘员舱、车身底部和表面凸起物外的真实车辆外流场的基本特征，同时国内外专家学者对 Ahmed 钝体做了比较深入的研究，也公布了一些数据，因而通过对 Ahmed 钝体的外流场模拟可以与结果做比较。对 Ahmed 钝体模拟是基于大涡模拟的瞬态模拟，求解模型采用分离求解器，隐式算法。计算时间步长设定为 0.0005 秒，初始及边界条件设置如下：速度入口： $U=60\text{ m/s}$ ， $V=0\text{ m/s}$ ， $W=0\text{ m/s}$ ，压力出口：相对压力 $P=0\text{ Pa}$ ，一个对称面和钝体表面为固壁无滑移壁面，其它边界固壁滑移壁面。计算过程中通过观察阻力系数变化选择合适的步数。通过数值分析，从而获得 Ahmed 钝体的阻力系数为 0.2903，Ahmed 钝体的试验值为 0.285，模拟值略比试验值大，误差为 1.86%，基本符合工程要求。其中图 4 图 5 和图 6 是在模

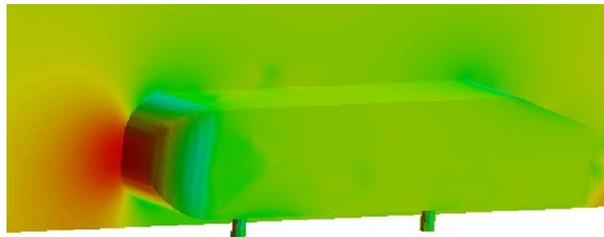


图 4 Ahmed钝体表面压力和对称面压力分布

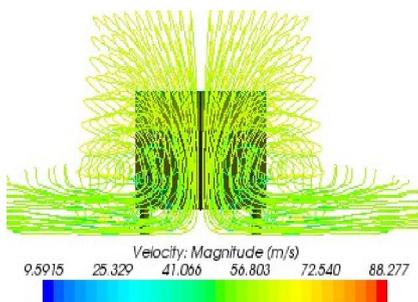


图 5 Ahmed钝体尾部流线

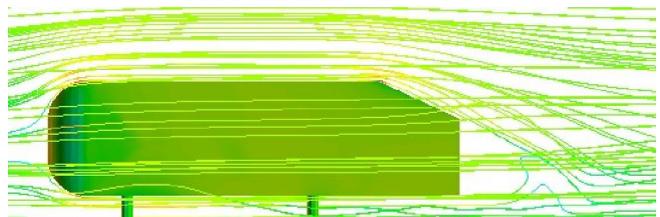


图 6 Ahmed钝体外部流线

拟计算过程中产生的数据图形。通过对 Ahmed 钝体的模拟，可以验证利用 STAR-CCM 软件模拟货车外流场具有可行性。

4 厢式货车外流场数值模拟及其分析

4.1 网格划分

对进行体网格划分和 Ahmed 钝体一样，首先要对货车做相应的计算域，同时要生成相应的体网格。对于计算域的建立，为了消除壁面的干扰，计算区域货车的前方设置为 5 倍的车长，上方为 5 倍车高，侧面为 5 倍车宽，后方为 10 倍车长。网格划分采用 Trimmer，建立的网格模型如图 7，生成 150 万网格。

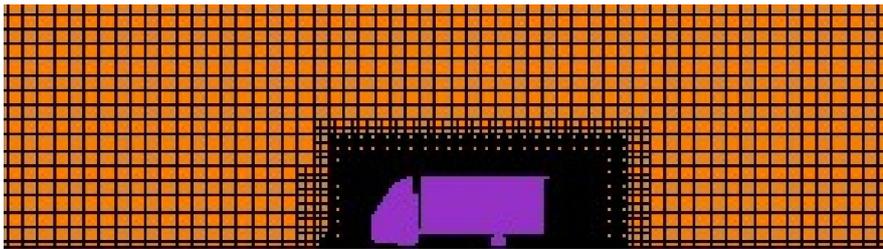


图 7 货车体网格图

4.2 边界条件的设置

车头前远端来流方向的端面为入口边界，入口风速设定为 80 km/h ；车后远端断面为压力出口边界条件，车体表面、计算区域地面、侧面和上表面为固定壁面，由于货车是完全对称的，为节省计算内存，利用对称面将计算区域一分为二。流体介质采用空气，密度为 1.18415 kg/m^3 ，粘度为 $1.85508 \times 10^{-5}\text{ pa}\cdot\text{s}$ 。对货车模拟是基于大涡模拟的瞬态模拟，求解模型采用分离求解器，隐式算法。计算时间步长设定为 0.0005 秒 。

4.3 计算结果与分析

STAR-CCM 是以数据和图形的方式显示出来的，在计算阻力系数的过程中是以二维图形显示出来，在达到收敛时计算出的气动阻力系数为 C_d 为 0.753 ，一般厢式货车的气动阻力系数 C_d 在 0.55 与 1.1 之间，计算结果与实际相符。图 8 至图 11 为模拟结果的数据图形，从计算结果图形可以看出阻力的主要来源是货车前后形成的压差阻力。

图 8 为货车尾部流线图，从这可以看出在车厢尾部，上侧及下侧均出现气流分离现象，在车厢尾部上侧形成下卷漩涡，下侧形成上卷漩涡，由于涡结构的存在导致大量能量的消耗，同时因为气流流到尾部后，突然失去了限制，从而在尾部形成剪切层，因此在车尾形成负压区。图 9 为货车外部流线图，从图中可以看出，从远方来流的气体突然遇到车头部的阻挡，速度急剧下降，几乎接近于零，从而在车头部产生阻滞区域。由于车头部分的存在，使得气体沿四个部分流出，这就产生了气体的分离现象，气体的分离使得一部分气体沿货车左

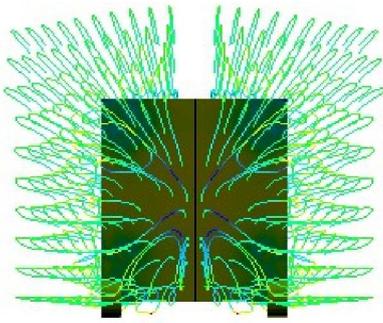


图 8 货车尾部流线图

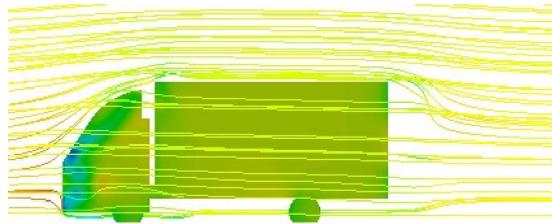


图 9 货车外部流线图

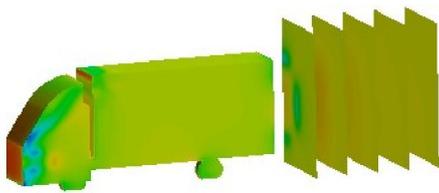


图 10 货车外部和尾部不同间距压力图

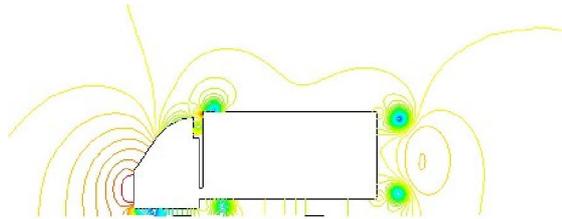


图 11 对称面压力等值线图

右侧流动，一部分沿货车头部向上流动，另外一部分沿货车下部流动。向上的气体顺着驾驶室外表面继续流动，当气体流到驾驶室顶部后一部分气体再次发生分离，同时另外一部分气体继续流动，并在遇到车厢前部时，由于阻力的存在，又有一部分气体发生了分离。随着气体的流动，发生分离的气体再次附着车厢，直至流到货车的尾部，在气体即将脱离货车时，使得气体再次发生了分离，同理其它几部分的气体在相应的部分也发生了分离，这些发生分离的气体使得气体流动变化非常复杂，使得这部分的湍动动能很大，导致大量的能量的消耗，使得货车的阻力增加。

图 10和图 11是货车压力数据图形，从图 10可以看出货车的前后压差是形成货车阻力的主要来源，在货车的头部由于阻滞区域的产生，产生了相当大的正压区，同理，在货车车厢的前部分也产生了正压区，而在货车的尾部由于漩涡的产生，在后部产生相应的负压区域，这样由于形成了前后压力差，从而产生了气体阻力。图 11是对称面压力等值线图，从图中可以明显看出存在五个漩涡，车厢上部涡的产生，由于当气流到达车厢上部时，车厢前部的阻挡作用，气流逆压强梯度流动，导致在此形成一个相对稳定且有明显漩涡的区域，车头底部和车厢底部两个涡的产生，是由于气体在分离面的分离作用，使得这两处的压强较低，从而使气流形成漩涡。尾流区存在两个旋转方向相反、一上一下分布的漩涡，处于上方的漩涡呈顺时针旋转，处于下方的漩涡呈逆时针旋转。出现倒流的主原因是因为在车尾，气流失去附着，进入自由边界层，在剪切作用下将死水区内的流体卷吸到主流中去，于是在尾部形成大尺度的漩涡，这些漩涡的产生快速的消耗了能量，从而使此处压强极低，最终导致了压差阻力。对于这些容易产生漩涡的部分，在设计过程中可以选择合适的弧度过渡，同时也可以适当的设置扰流板，从而使气流更加顺畅，达到减少阻力的作用。

5结论

通过以上的分析可以得出以下方面的结论：

- 1) 随着计算机处理能力的提升，使得大涡模拟越来越受关注，本文通过对 Ahmed钝体的外流场模拟，和对实验数据的对比，可以看出在运用大涡模拟方面， STAR-CCM+可以很好的分析货车的外流场。
- 2) 通过模拟结果的分析，厢式货车产生的阻力主要来源是前后形成的压差阻力，而这些压差阻力的产生是由于气体在车头部形成的阻滞区域和在车厢气体的分离造成的。

6 参考文献

- [1] 傅立敏，扶原放．轿车外流场车轮转动时侧风效应的数值模拟研究．公路交通科技，2006
- [2] 谷正气．汽车空气动力学 [M] 北京：人民交通出版社，2005:30- 71.
- [3] 王福军．计算流体动力学分析 -CFD 软件原理与应用．北京：清华大学出版社，2004
- [4] 杜广生．厢式货车尾流特性的研究 [J]．农业机械学报，2002
- [5] 陈见，过学迅．小货车外流场三维计算和分析．汽车科技．武汉理工大学汽车工程学院，2008.
- [6] 金文，湍流结构及大涡模拟研究．能源与环境，2005.
- [7] 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.
- [8] 柏劲松，李平，王涛，等．可压缩多介质粘性流体的数值计算 [J] 爆炸与冲击，2007.
- [9] 张兆顺，崔桂香，许春晓．湍流理论与模拟 [M] 北京：清华大学出版社，2005.
- [10] 沈俊，CFD在汽车空气动力学中的应用 [J] 汽车技术，2000.