

某款乘用车外流场及发动机舱内流动分析

The Aerodynamic and Underhood Simulation of a Passenger Vehicle

陈皓 王小碧 王伟民 史建鹏

东风汽车公司技术中心, 武汉 430056

摘 要: 应用 STAR-CCM+软件对某款乘用车进行整体空气动力学仿真分析, 并对机舱内冷却气体流动情况进行数值模拟。通过仿真分析发现了影响阻力系数的关键零部件。在设计布置舱内各个零部件阶段, 通过对机舱内冷却气体的计算模拟判断, 得出是否满足舱内冷却设计要求, 为机舱内布置进一步优化提供依据。

关键词: 乘用车 空气动力学 发动机舱 CFD STAR-CCM+

Abstract: Simulation analysis of the aerodynamic and underhood of a passenger vehicle was introduced in the paper by using STAR-CCM+. We have found the key parts that effect drag coefficient. Whether the cooling system satisfied the desire of design should be estimated according to simulation results. Those results can provide the basis of the further optimization of underhood arrangement in the design and decoration of components inside the engine compartment.

Key Word: vehicle, Aerodynamic, Underhood, CFD, STAR-CCM+

1 前言

在过去的几十年中, 随着计算机技术的发展, CFD 技术被越来越多的应用到了汽车设计中。空气动力学指标是汽车 (特别是乘用车) 最重要的参数之一, 它对汽车的动力性、经济性、操纵稳定性等都有着及其重要的影响。当车速在 100km/h 时发动机 80% 的动力用来克服气动阻力, 整车空气动力学性能提高 10%, 油耗就会降低 4%~5%。重量轻的汽车, 特别是重心靠后的汽车, 对前轮的升力特别敏感, 这种情况对行驶中的汽车非常危险, 即当前轮有升力使车头上扬时, 升力就会随着车速的增加而继续增加, 致使前轮失去附着力而使汽车失去控制^[1]。

随着发动机功率的不断加大, 排放要求的逐步升高, 发动机舱内部件变得越来越模块化, 布置也越来越紧凑。发动机一般位于冷却模块后一个半封闭的舱内, 由于换热器 (冷凝器、散热器、中

冷器)、发动机本身、排气歧管以及三元催化器等多个高温热源布置在一个狭小的空间内,散热比较困难,较高的温度会影响到温度敏感部件的性能,温度过高时甚至会破坏这些部件。

本文应用 STAR-CCM+软件,在发动机舱设计布置之初,协助设计人员分析整车外流场以及机舱内冷态气体流动情况,为整车的布置提供理论依据。我们期望整车的阻力系数和升力系数都比较小,能有更多的冷却空气通过换热器到达机舱后部,避免泄漏、回流现象的发生,到达后舱的冷却空气应充分冷却发热部件。

2 计算模型

2.1 基本理论

基于所研究乘用车运动的实际情况,可以认为乘用车的流场为三维、定常、等温、不可压、粘性、湍流流动,其控制方程为雷诺平均 N-S 方程。

质量守恒方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (i=1, 2, 3) \quad (1)$$

动量守恒方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\mu + \mu_t) \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\mu + \mu_t) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right] - \frac{\partial}{\partial x_i} \left[p + \frac{2}{3} \rho k \right] \quad (2)$$

湍流动能方程:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U k) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \beta' \rho k w \quad (3)$$

湍流耗散方程:

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot [\rho U w] = \alpha_1 \frac{w}{k} P_k - \beta_1 \rho w^2 + \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{w1}} \right) \nabla w \right] \quad (4)$$

式中: u 为速度, μ 为动粘性系数, μ_t 为湍流动粘性系数, p 、 ρ 分别为压力、密度, k 为湍流动能。在本文中 x_1 为空间坐标 x , x_2 为空间坐标 y , x_3 为空间坐标 z 。

2.2 计算模型

计算模型包括车身外表面、前后车轮、发动机舱、进气格栅、冷却模块、发动机、变速箱、空气滤清器、蓄电池、底盘系统、排气系统、转向系统等影响气动阻力系数及机舱内空气流动的主要部件，模型如图 1、图 2。



图 1 整车计算域



图 2 Trim+Prism 网格

整个数模应用 STAR-CCM+软件的包面功能生成面网格，在进气格栅、后视镜、前端冷却模块等对气流影响比较大的部件进行了细化，对于车身外部等对气流影响较小的位置作了简化处理，控制网格的总体数量，共生成体网格约 1000 万。

2.3 风扇模型和换热器模型

风扇采用 MRF 方法进行模拟，转速采用该工况下的风扇的额定转速；在计算中，冷凝器和散热器均采用了多孔介质的计算模型，在多孔介质模型中以均匀化的压力变化来代替平行流式换热器等复杂结构，从而简化了模型，空气侧压力损失与空气流速的变化关系则由零部件风筒试验得到的曲线给定。



图 3 风扇 MRF 模型



图 4 冷却系统模型

2.4 边界条件

计算工况为汽车行驶时的流场分布,对于整车流场区域的进风口(inlet)设定为速度入口边界,分别计算来流速度为 30km/h、50km/h、100km/h 三种工况,出风口(outlet)为压力出口边界,车身表面和地面车头后部均设为无滑移壁面(no-slip wall),地面车头前部和其它流场计算域设为滑移壁面(slip wall)^[2]。

3 计算结果分析

计算整车外流场,得到考虑发动机舱内流的风阻系数,并把计算的风阻系数与不考虑发动机舱内流的风阻系数以及试验结果进行对比(如图 5),由此可以看出,在考虑了发动机舱内流之后风阻系数值更加接近于试验值,因此在计算风阻系数时加上发动机内的零部件计算结果更为准确。

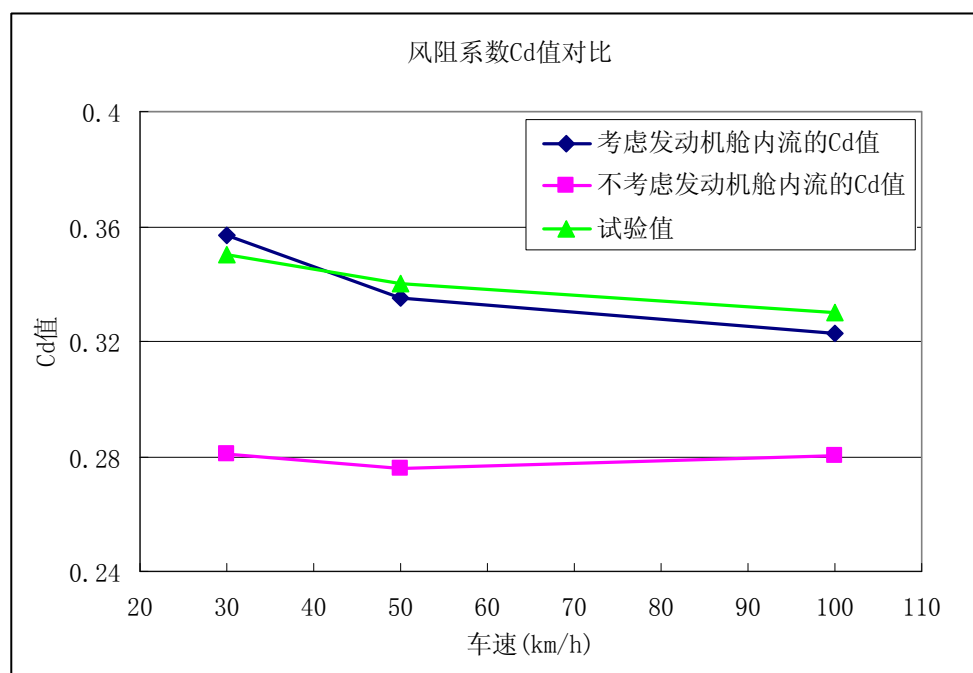


图 5 风阻系数 Cd 值的对比

由车身整体压力系数云图可知,如图 6,外部突出物(门把手、后视镜)、车身头部区域、前挡风玻璃下部以及轮胎迎风面的压力分布较大,增大了空气阻力,前进气格栅压力分布较大,冷却系统有效迎风面空气流量充足。

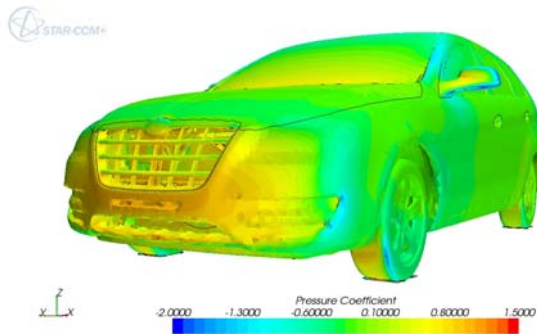


图 6 车身表面压力系数分布云图

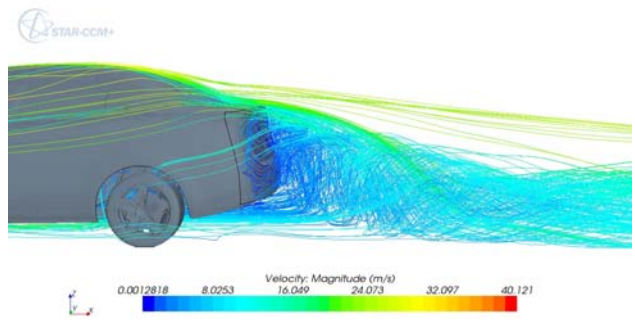
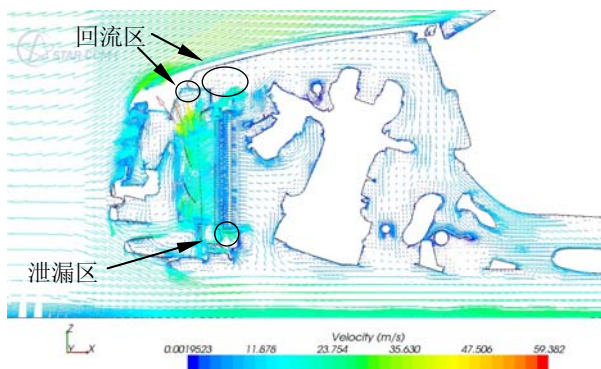
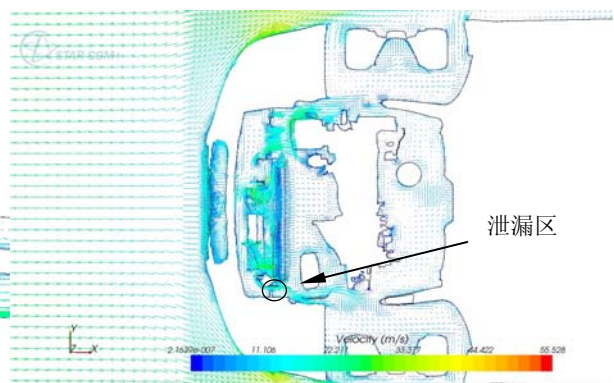


图 7 尾部流线图

观察整车流线分布,如图 7,车身尾部产生一个很大的脱体涡,形成了较大的负压区,增大了空气阻力,尾部的造型设计对整车空气阻力产生了较大的影响,从尾部流线看,空气在车身后部形成的涡流平顺的从车后脱离,过度相对比较平缓,不至于产生较大的压差阻力。机舱下导流板对降低底盘部件对空气阻力的影响起到了一定的作用,但机舱内零部件及后保险杠处产生较大压力,增大了空气阻力,同时平整的底部布局可有效减少底部涡流的产生,减少对流动的影响。

图 8 $y=0$ 舱内速度矢量图图 9 $z=0.25\text{m}$ 舱内速度矢量图

舱内流动如图 8、图 9 所示,从进气格栅进入的冷却空气有相当大的一部分没有经过冷却系统而进入到发动机后舱,这些泄漏大大影响了冷凝器和散热器的散热效果。从图 8 中还可以看出,在发动机舱上部前端有一块流动的死区,气流在此处形成了滞留涡,这将不利于舱内热空气的顺利排出,造成散热效率的降低。

计算车速为 100km/h 得到,流经换热器的冷却空气质量流量和平均流速(如表 1)^[3]。

表 1 流经换热器的冷却气体质量流量

	质量流量 (kg/s)	平均流速 (m/s)
冷凝器	1.00	4.92
散热器	1.12	4.64

通过以上分析可以看到, 计算不但使我们获得了机舱内流动的宏观数据, 也很好的显示了发动机舱内的流动细节, 为更好的研究机舱内流动情况, 对一些部件的局部改进, 提供了直观而明确的指导。这些对于优化发动机舱的布置, 提高冷却系统效能具有实际的指导意义^[4]。

4 结论

通过对整车流场以及发动机舱内部流场的分析, 可以得出如下结论:

- 1) 在计算整车风阻系数中, 考虑发动机舱内流的计算结果要比简化模型不考虑发动机舱内流的计算结果更加准确, 但是只能在发动机舱的布置比较完善的时候才能实施含发动机舱的外流场的计算。
- 2) 对发动机舱内部流场的冷态分析, 可以详细得出冷却空气在机舱内的流动情况, 为设计人员进一步优化机舱内布置提供了理论依据。
- 3) 利用 CFD 技术, 能够在汽车设计的初期阶段对不同设计方案进行比较分析, 预测性能, 从中选出最优的方案进行部件布置, 避免开发后期出现难以解决的问题, 从而加快开发速度, 减少试验次数与费用。

5 参考文献

- [1] 王福军编,《计算流体动力学分析》, 清华大学出版社。
- [2] 刘希东, 某 SUV 车动力舱内流动分析, 2009 年 CDAJ—China 中国用户论文集, 2009。
- [3] 昞强, 汽车空气动力学仿真, 2009 年 CDAJ—China 中国用户论文集, 2009。
- [4] 姚仲鹏,《车辆冷却传热》, 北京理工大学, 2001。
- [5] User Guide of Computational Fluid Dynamic Software STAR-CD version 3.2, 2004。