

以 CFD 仿真技术为基础的轻卡导流罩研究

Study of Light Truck Cowl Design Based on CFD Technology

夏广飞, 白福军, 吴根忠

安徽江淮汽车股份有限公司

摘要: 一般情况下, CFD 在外流场方面的仿真一般应用在对风阻系数和升力系数有所限制的乘用车领域, 但是某款轻卡导流罩设计的案例使 CFD 仿真在商用车外流场领域也有发挥的余地。优良的导流罩设计可以有效地降低卡车空气阻力, 节省燃油, 这也是目前很多卡车采用导流罩设计的原因。那么如何才能在兼顾造型风格的前提下设计出空气阻力较小的导流罩是本文研究的目的所在。

关键词: 导流罩, 计算流体力学, 汽车

Abstract: Generally, exterior aerodynamics analysis of CFD is used on passenger car in which the Cd and Cl are both limited. But the design of light truck cowl make CFD analysis useful. A good design of the cowl can reduce aerodynamics resistance, economize fuel. And this is why so many car companies design a cowl for their trucks. So, how to design a cowl with good shape and small Cd is the purpose of this discourse.

Keywords: Light Truck Cowl, CFD, Automobile

前言

随着汽车技术和高速公路的发展, 汽车行驶速度日益提高, 汽车在行驶时与空气相互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。近年来, 汽车空气动力学数值模拟发展迅速, 而通过对其进行空气动力学性能优化, 降低空气阻力系数, 提高燃油经济性, 可产生相当可观的经济效益。导流罩的使用, 为绿色货运做了贡献, 对解决货运业节能减排难题提出了新的思路和解决办法。

我国在轻卡这个细分市场的需求量还是非常大的, 这也导致轻卡市场的竞争越来越激烈, 各企业在轻卡品质、成本等方面也是下足了功夫。同时, 轻卡的燃油经济性也被提上了日程。一方面, 轻卡的轻量化设计、提高发动机效率等措施确实在降低油耗方面有显著效果; 另一方面, 从外部造型方面来降低油耗也是比较有效的, 这体现在导流罩的设计上。

所以, 在发动机、轻量化等方面受到限制时, 设计一款好的导流罩也是可以起到很好的效果的。

1 空气动力学基础理论

空气动力学是研究物体与空气发生相对运动时相互作用规律的一门学科。

广义上说，它是物理学的一个分支，因为它导源于流体力学，而流体力学是物理学的一个分支。

1.1 气体运动的基本方程

1.1.1 连续方程

连续方程又名质量方程，是把质量守恒定律应用于流体得到的数学关系式。在汽车空气动力学领域，一般认为流体的密度在运动过程中不变，即 $\rho = \text{常数}$ ，这种流体称为不可压流，其连续方程为：

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

1.1.2 动量方程

积分形式的动量方程：

$$\sum \vec{F} = q_{m,2} \vec{v}_2 - q_{m,1} \vec{v}_1 \quad (2)$$

应用中一般将上式改写为：

$$\left. \begin{aligned} \sum F_x &= q_{m,2} v_{x,2} - q_{m,1} v_{x,1} \\ \sum F_y &= q_{m,2} v_{y,2} - q_{m,1} v_{y,1} \\ \sum F_z &= q_{m,2} v_{z,2} - q_{m,1} v_{z,1} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

微分形式的动量方程： $dP + \rho g dy + \rho v dv = 0$ 。该式通常也被称为一维流动的欧拉运动微分方程。

1.1.3 伯努利方程

将式 (14) 中每一项除以 ds ，得：

$$\frac{dP}{ds} + \rho g \frac{dy}{ds} + \rho v \frac{dv}{ds} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{d}{ds} \left(P + \rho g y + \frac{1}{2} \rho v^2 \right) = 0 \quad (5)$$

这是一个全微分，积分后得：

$$P + \rho g y + \frac{1}{2} \rho v^2 = C \quad (6)$$

1.2 k- ω 湍流模型

1.2.1 标准标准k- ω 湍流模型

标准k- ω 模型是基于Wilcox k- ω 模型，它是为考虑低雷诺数、可压缩性和剪切流传播而修改的。Wilcox k- ω 模型预测了自由剪切流传播速率，像尾流、混合流动、平板绕流、圆柱绕流和放射状喷射，因而可以应用于墙壁束缚流动和自由剪切流动。标准k-e模型的一个变形是SST k- ω 模型。

1.2.2 剪切压力传输 (SST) $k-\omega$ 模型

SST $k-\omega$ 模型由 Menter 发展, 以便使得在广泛的领域中可以独立于 $k-e$ 模型, 使得在近壁自由流中 $k-\omega$ 模型有广泛的应用范围和精度。为了达到此目的, $k-e$ 模型变成了 $k-\omega$ 公式。SST $k-\omega$ 模型和标准 $k-\omega$ 模型相似, 但有以下改进:

- SST $k-\omega$ 模型和 $k-e$ 模型的变形增长于混合功能和双模型加在一起。混合功能是为近壁区域设计的, 这个区域对标准 $k-\omega$ 模型有效, 还有自由表面, 这对 $k-e$ 模型的变形有效。
- SST $k-\omega$ 模型合并了来源于 ω 方程中的交叉扩散。
- 湍流粘度考虑到了湍流剪应力的传波。
- 模型常量不同

这些改进使得 SST $k-\omega$ 模型比标准 $k-\omega$ 模型在广泛的流动领域中有更高的精度和可信度。

2 某轻卡导流罩分析与研究

据试验人员反馈, 某款轻型卡车在相同的试验路面、相同的工况以及同一个驾驶员的情况下, 安装自身导流罩时的百公里油耗比安装标杆车导流罩时的百公里油耗高出 0.5L。根据网上资料显示, 一般经常出车的轻型卡车, 一年的里程数在 10 万公里左右, 按目前 0 号柴油价格 7.3 元计算, 该轻型卡车安装自身导流罩时一年的油费要比安装标杆车导流罩时一年的油费高出 3650 元, 这必定会使该款轻卡的市场竞争力相对下降, 而且顾客也容易产生抱怨。

由此可见, 导流罩的设计是很有意义的, 它不仅可以降低阻力和油耗, 而且从一定程度上还可以提升品牌竞争力, 减少顾客抱怨。

2.1 仿真模型建立

为了找出导流罩对该轻卡油耗的影响, 建立了该轻卡分别安装自身导流罩和标杆车导流罩的仿真模型。由于本次分析的目的是对比导流罩引起的流场在车身上的分布, 故对分析模型进行了简化, 如图 1 和图 2。

通过对几何的对比, 发现最主要的差别在于自身导流罩覆盖货箱的面积小, 而标杆车导流罩覆盖货箱的面积大。

图 1 安装自身导流罩

图 2 安装标杆车导流罩

图 3 安装自身导流罩正视图

图 4 安装标杆车导流罩正视图

图 5 中截面网格模型

图 6 导流罩上的网格模型

2.2 分析结果

由于对分析模型进行了简化, 所以计算出来的风阻系数比实车风阻系数要小, 但分析基准是相同的, 所以计算结果的可对比性还是很强的。

2.2.1 风阻系数计算结果对比

从分析结果可以看出, 安装自身导流罩时的风阻系数比安装标杆车导流罩时的风阻系数高出 7.4%, 这使得试验人员反馈的问题得到了合理的解释。

表 1 风阻系数计算结果

导流罩方案	风阻系数 Cd
自身导流罩	0.46
标杆车导流罩	0.428

2.2.2 压力云图对比

从压力云图可以看出, 该轻型卡车在安装自身导流罩时货箱上的高压区明显大于安装标杆车导流罩时的情况, 这也从一方面解释了前者风阻系数较大的问题。

2.2.3

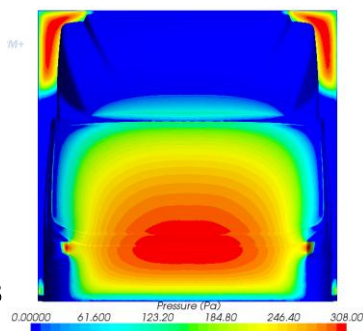


图 8 安装标杆车导流罩压力云图

从流线可以看出, 该轻型卡车自身的导流罩引起的流场比较紊乱, 而标杆车导流罩所引起的流场相对顺畅。

图 9 安装自身导流罩流线

图 10 安装标杆车导流罩流线

2.3 优化分析及结果

优化方案对该轻卡导流罩做了三处修改, 目的是减小货箱上的高压区以及优化流场。从分析结果可以清晰地看出, 优化后货箱上的高压区明显减小, 流线也得到了相当大的改善。

另外，由于优化目的达到，所以风阻系数也相应地降低到了 $C_d=0.424$ 。

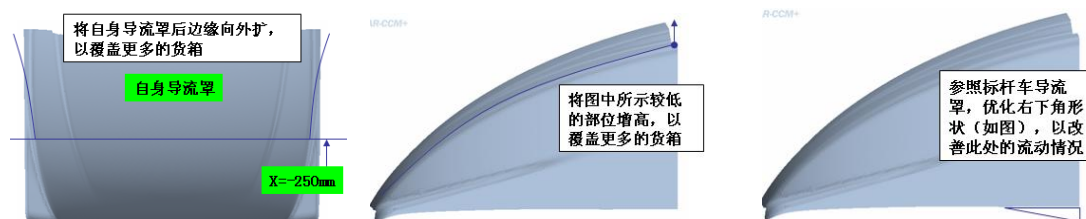


图 11 自身导流罩优化方案

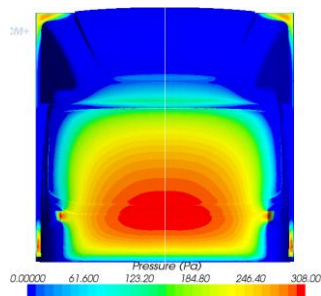


图 12 优化方案压力云图

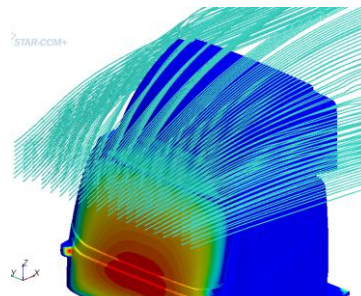


图 13 优化方案流线图



图 14 方案实施

3 结论

本文通过对某轻型卡车安装两款导流罩时的风阻系数、压力云图以及流线等方面的对比，找出了安装自身导流罩时油耗偏高的原因，并对提出的优化方案进行了分析验证。

综上所述，得出以下结论：

1. 该轻卡安装自身导流罩时的风阻系数（0.46）比安装标杆车导流罩时的风阻系数（0.428）高出 7.4%。阻力大是导致油耗偏高的根本原因；
2. 通过三种优化措施的修改，使风阻系数降低到 0.424，小于原导流罩和标杆车；
3. 本文的分析说明，导流罩的设计应尽量降低其阻力以降低油耗；
4. 在设计导流罩时，应尽量覆盖货箱，并使其造型尽量圆滑、流畅。

参考文献

- 1 傅立敏. 汽车空气动力学. 长春: 机械工业出版社, 2005. 33~47.
- 2 王福军. 计算流体动力学分析-CFD 软件原理与应用. [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.