某重型载货车空调系统 CFD 分析与优化

撰文／一汽解放汽车有限公司　吕东　陈涛　郝勇　王永康

本文针对某重型载货车空调风道系统进行流态仿真数值分析。计算结果显示，原始方案的出风口气流流量分配不合理，主驾驶员侧的热舒适性较差。基于此对空调风道进行改进，在风道出口附近增加内部导流板并进行优化，有效地改善了出风口的气流分布，使风量分配更加均匀，明显提高了驾驶室的舒适性。

随着经济的发展，汽车市场的竞争愈发激烈，人们对汽车性能以及舒适性的要求也逐步提高，因此空调系统的设计变得至关重要。车厢内部空间有限且封闭，空调风道系统于气流布局的合理性将直接影响驾乘人员的身心健康，合适的温、湿度和新鲜的空气会缓解驾驶员的疲劳，提高行车安全性。

近年来，随着计算机的迅猛发展，计算流体力学（CFD）在汽车空气动力学方向开创了新的研究方法，能够真实有效地模拟气流流动并快速获取流动特性参数，分析气流布局的合理性，进而对空调风道系统进行优化改进设计。20 世纪 90 年代，Yamamot 对卡车驾驶舱进行了简单的流场数值模拟，同时编写了用于评价热舒适性的程序。通过对比试验数据，发现吻合性良好。2007 年，安徽江淮汽车公司的霍长宏等人基于 CFD 方法对某轻卡驾驶室除霜风道出口流量分配、速度场和压力场进行了分析，并对风道进行了改进。2011 年，芦克龙，谷正气等人对某重型货车空调系统及驾驶室气流分布进行了仿真计算，并与试验值对比，针对风量分配不均的问题对风道进行了改进。在对载货车空调的研究中，大部分学者侧重于通过调整结构数据的方法进行改进，并未系统地采取更为详细的优化设计。基于此，作者将待改进结构定义设计变量，并取 40 组样本进行参数优化，得到更加合理的优化结果。

本文采用 STAR-CCM+ 软件，对某重型载货车的空调吹面风道进行流态数值模拟，得到出风口的流量分布，并与实车测试值进行对比，进而分析流量分布的合理性，实施优化方案设计，提高了驾驶室的舒适性。

一、空调风道系统 CFD 模型

汽车空调风道系统主要由风道和出口格栅等构成，按其作用可以分为吹面风道、吹脚风道和吹窗风道。一般情况下，各风道之间相互独立，根据风道功能及其组合便可组成不同的工作模式。通过用户反馈和前期分析得知某重型载货车主副驾驶室热舒适性差别较大，同时考虑到吹面风道质量流量较大，对驾驶室热舒适性起主导作用，故只针对吹面风道进行建模分析和优化。

1．物理模型

本文采用实车 1 ： 1 比例模型，空调吹面风道由 1 个入口和 6 个出风口组成，其中驾驶侧为出风口 1，副驾驶侧为出风口 6，三维几何模型如图 1 所示。由于驾驶室的热舒适性取决于各出风口风量，所以通过计算各出风口的流量，并根据设计目标修改风道的形状，以对流量分布进行优化设计。

2．力学模型及控制方程

由于管道入口平均流速为 7.96，$Ma=v/c=0.023$，马赫数较小，认为流体密度为常数；$Fr=\sqrt{v^2/gL}=27.63$，

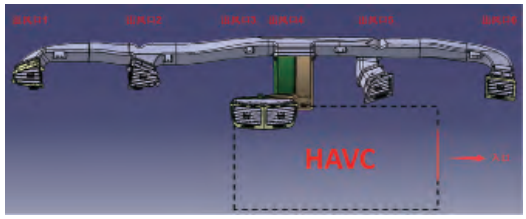

图 1 吹面风道几何模型

弗劳德数较小，忽略重力的影响。从入口到出口，整个过程中热量损失较少，不考虑温度的影响。由于只关注风机 / 压缩机在最大功率下稳定状态的风量分配，所以流动近似稳态流动。基于以上条件，从图 1 中可看出风道结构形式是不规则的，气流在风道系统中以复杂的湍流形式运动，对湍流的处理采用不可压缩流体的标准 k–ε 双方程模型。标准 k–ε 模型为半经验公式，其中湍流动能 ε 方程是精确方程，而湍流耗散率 ε 方程是由经验公式导出的方程。

根据试验数据将入口设置为质量入口，出口设置为压力出口，相关边界条件及相应参数输入如表 1 所示。

表 1 边界条件及参数输入

边界	入口（质量流量入口）	出口（压力出口）	壁面、风道
参数	0.08959kg/s	101325.0 Pa	无滑移边界

3. 求解、网格、算法设置

CFD 网格模型如图 2 所示，选用 simple 算法求解，采用一阶迎风离散格式。

图 2 CFD 网格模型网格

二、空调风道仿真分析及优化设计

本节对空调风道出风口的流量分布计算结果与实车测试值进行对比分析，同时根据设计目标进行优化设计。

1. 出风口流量试验与仿真对比

考虑到优化所需循环迭代次数较多，为了提高计算效率，减少网格数量，对于吹面风道 CFD 模型进行了两种处理，第一种是有出口格栅的风道模型；第二种是去掉出口格栅的风道模型。使用德图多功能风速计对实车空调出风口进行风量测试，该风速计测试精度可达 2%，并满足 EC 标准（90/336/EEC）的要求。将测试数据与 CFD 仿真数据进行风量分配对比，以测试数据为基准值，有出口格栅的风道 CFD 仿真数据与其对比误差在 5% 以内，去掉出口格栅的风道模型误差最大可达 24%，可见有格栅模型出风效果更符合实际。所以有出口格栅的风道 CFD 模型更准确，可以用于优化设计。

2. 结果分析

通过计算可以得到风道流态仿真结果，从而得到各出风口以及驾驶室各区域的流量分布分配。图 3、图 4 分别给出了原结构风道内表面静压云图和内部速度流线图。从图 5 可看出风道内表面静压分布较均匀，分风拐角处高低压差较大，3、4 出风口静压差较大。从图 4 可看出 1、2、6 出风口流量分配较合理，5 口流量略小，3 口较 4 口流量明显偏小。各出风口流量分布不均匀，部分达到设计目标，主要是 3、4 出风口风量比例相差较大，4 口较 3 口大 60%，主驾驶侧流量较副驾驶侧偏小 27%。对于重型载货车，主驾驶员为热舒适性的主要评价者，因此在保证驾驶室整体热舒适性较均匀的前提下，应尽量使驾驶员侧风量大于副驾驶侧。

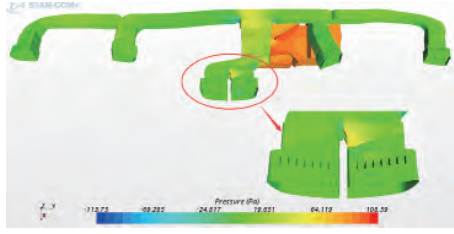

图 3 原结构风道压力云图

(a) 1、2 口流量　(b) 3、4 口流量　(c) 5、6 口流量

图 4 原结构风道速度流线图

通过对原风道结构以及静压图和速度流线图的分析可知，造成流量分配不均匀的因素主要有两个：4 出风口在风道主线上，而 3 出风口偏离主线，6 出风口导流结构不合理。为了使流场分布更合理，从而改善驾驶室的热舒适性，需要对原空调风道结构进行优化改进。

3. 优化分析

根据之前的分析，气流分布不均主要由 3、4 出风口分

投稿邮箱 | cadcam@idnovo.com.cn
IMCHINA@idnovo.com.cn

配不合理造成，为了改进送风效果，以主、副驾驶侧风量相等为优化目标，对空调风道出风口处导流结构进行优化，如图 5 所示，给出以下两个优化方案。

方案一：针对 3、4 出风口管道两侧壁面进行横向尺寸变化的 DOE 分析。

方案二：在 3、4 出风口处根据管道中线增加导流板并对导流板进行进一步优化。

(a) 3、4 口管道横向优化　(b) 3、4 口增加导流板

图 5 优化前后模型对比图

取方案中计算结果显示效果最佳的一组数据，经过分析，改善的效果不佳，主驾驶侧流量只提高了 3 个百分点，可见只改变 3、4 出口管道两侧壁面横向尺寸不足以改善风量分配比，这是因为 3、4 出风口的气流得不到有效的控制，故方案一不可行。而方案二中只在 3、4 出口处增加一块导流板后，3 口流量增大，主驾驶侧流量比副驾驶侧大 18%，明显地改善了风量分配，因此可以在方案二的基础上对导流板进行进一步优化。

将待优化处结构设置为浮动结构，布置控制点，进行设计变量的定义并完成参数优化，取 40 组计算结果，选择最优数据进行分析。图 6 对优化前后各出风口流量的分配比数据进行了对比，对优化效果进行直观的表现。图 7、图 8 分别为优化后结构风道内表面静压云图和内部速度流线图，从图 7 可看出风道内表面静压分布较均匀，3、4 出风口静压差降低。从图 10 可看出 1、2 和 5、6 出风口流量分配均较合理，3、4 出风口流量明显得到改善，基本相等。可见 3、4 出风口处导流板装置可以约束气流流向，通过优化其位置达到控制气流分配的目的，经过数据分析该方案能满足分配

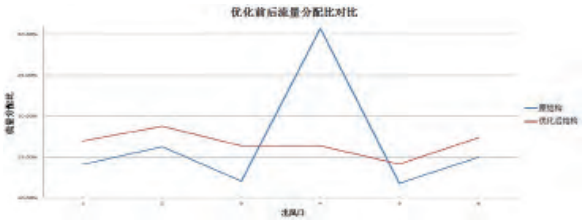

图 6 优化前后流量分配比对比图表

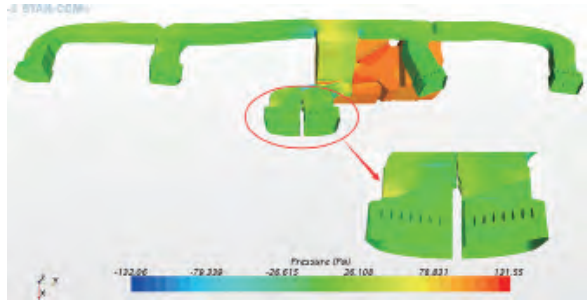

图 7 风道结构优化后压力云图

(a) 1、2 口流量　(b) 3、4 口流量　(c) 5、6 口流量

图 8 风道结构优化后速度流线图

要求，使各出风口风量均匀且主驾驶侧风量偏大，且精度达到 16.67%±3%，主驾驶侧的流量总量提高 10%，主驾驶侧流量比副驾驶侧大 8%。

三、结论

本文主要针对空调系统原结构的热舒适性缺陷进行了优化方案的确定及设计。最终方案很好地解决了空调出风口气流分配不均匀的问题，改善了驾驶室内部的气流布局，为重型载货车驾驶员提供了一个更好的驾乘环境，也为汽车空调风道系统的设计提供了有效的设计方法和技术手段。IM