

汽车发动机舱密封性CFD研究

王弘扬, 徐磊, 张雪艳

一汽-大众汽车有限公司 吉林长春 130011

摘要: 汽车发动机舱流场密封性直接影响整车散热性能, 并间接影响动力性和续驶里程。采用CFD手段, 对某SUV车型的前舱流场进行分析, 发现散热器与周边零件存在空隙导致密封性下降。针对该问题, 设计泡沫密封件对空隙进行封堵, 通过仿真发现, 最大车速工况下进风利用率提升了3.8%, 怠速工况下热空气回流占比降低了5%, 验证了措施的有效性。

关键词: 发动机舱; 密封性; 数值模拟

冷却系统的散热器和空调系统的冷凝器布置在整车发动机舱前端, 以格栅进入的空气为介质散热, 因此前机舱的空气流场将直接影响上述系统的性能, 更高的密封性可减少冷空气泄露和热空气回流^[1, 2], 也可减少整车空气阻力^[3]。张坤等^[4]通过CFD手段验证了减少热空气回流后对发动机舱散热的改善情况。朱晴等^[5]研究了不同密封结构对进气利用率的影响。Mathur^[6]通过风洞试验研究了12种车型的前端流场, 发现均存在不同程度的密封设计缺陷。

本研究通过CFD手段对前舱流场进行分析, 识别泄漏点并提出解决方案, 优化了某SUV车型的的前舱密封性。

物理模型与网格

1. 几何结构

为准确分析发动机舱内空气侧流场状态, 使用1:1

尺寸搭建整车模型, 保留机舱内全部零部件结构, 对于本研究最关注的前格栅到冷却模块间的空气流域, 尽量不做简化处理, 并注意保留各零件间的空隙。对于冷却模块后的发动机变速器等零件, 因对所关注流域影响有限且结构过于复杂, 仅保留外部轮廓。风洞尺寸为: 30 000mm × 5 000mm × 6 500mm。

2. 网格划分

因整车零部件多且结构复杂, 因此采用自下而上的非结构化网格生成策略, 如图1所示, 分别生成各零件的三角形面网格后, 拼接成整车面网格, 后基于面

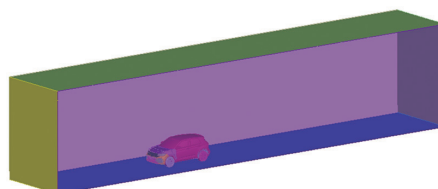


图1 风洞与整车模型

网格尺寸生成整车体网格。其中，格栅、散热器、导风件等重要零件基本单元为4mm，车身表面基本单元为12mm。整车面网格数量为700万个，体网格数量为4300万个。

数学模型

1.控制方程

本研究中，因空气流速较低，简化为不可压缩流体。散热器翅片区域通过多孔介质模型简化，流体所占体积份额由多孔介质区内每个网格的孔隙率表征。

质量守恒方程

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \tag{1}$$

式中 ρ ——密度；

$\vec{v}$ ——流速。

动量守恒方程

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot \bar{\bar{\tau}} + \rho \vec{g} + S_v \tag{2}$$

式中 p ——静压；

S_v ——广义源项；

$\bar{\bar{\tau}}$ ——应力张量。

$$\bar{\bar{\tau}} = \mu \left[(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I \right] \tag{3}$$

式中 μ ——黏度；

I ——单位张量。

对于散热器芯体的翅片结构，阻力由一个附加阻力源项表示，由粘性损失项与惯性损失项组成。

$$S_v = - \left(\frac{\mu}{\alpha} \vec{v} + C_i \frac{1}{2} \rho \vec{v} \vec{v} \right) \tag{4}$$

式中 $\frac{1}{\alpha}$ ——黏性阻力系数；

C_i ——惯性阻力系数。

2.湍流模型

根据发动机舱内空气的流动特性，本研究采用可实现 $k-\varepsilon$ 湍流模型，相比于标准 $k-\varepsilon$ 模型，可更好地模拟湍流等流动状态^[7]。

3.边界条件

为更好地分析前舱的冷空气泄漏和热空气回流状态，分别针对最大车速工况和怠速工况进行仿真，边界条件见表1。

表1 边界条件

边界位置	边界类型
风洞入口	速度入口
风洞出口	压力出口
风洞地面	移动壁面

模型中包括冷凝器、低温散热器和高温散热器三个多孔介质区，通过试验获得各散热器的压降损失与迎面风速的拟合曲线，如图2所示。

通过设置空气通过扇叶位置的压力变化，模拟风扇对流场的影响，压降与风速的关系通过试验测得后拟合曲线，如图3所示。对于最大车速工况，风扇为零功率状态；怠速工况，风扇为最大功率状态。

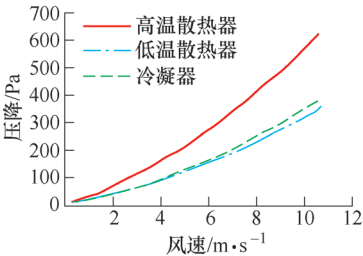


图2 散热器风阻特性

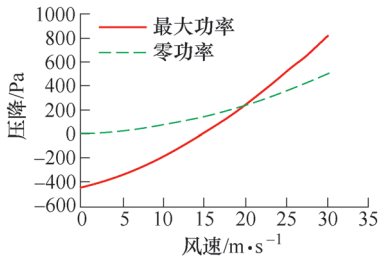


图3 扇叶风阻特性

结果与讨论

1.密封优化前流场分析

为定量评价前舱密封性，定义两个参数：进风利用率和热空气回流占比。在最大车速工况下，格栅进入的风量大于通过冷却模块风量，以进风利用率评价密封性，等于通过主散热器风量与格栅进入风量的比值，此值越高说明密封性越好。在怠速工况下，格栅进入的风量小于通过冷却模块风量，以热空气回流占比评价密封性，等于通过主散热器风量减去格栅风量

后，与主散热器风量的比值，此值越低说明密封性越好。

图4所示是冷却模块位置结构，冷却模块固定在前端框架上，四个导风件连接前格栅与冷却模块构成一个风道。但在散热器的四个角位置，因装配工艺，存在一个无法由导风件密封的空隙，因此可能存在泄漏点。

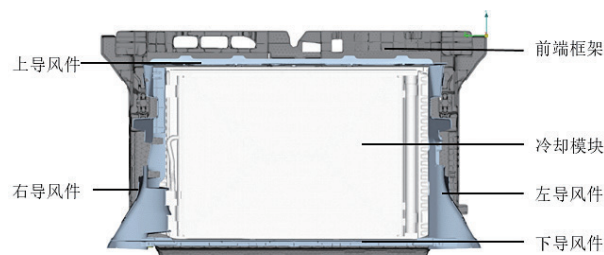


图4 冷却模块周边结构

图5和图6所示是在密封优化前的最大车速工况和怠速工况下速度矢量图。在最大车速工况，可以看到导风件将从格栅进入的大部分空气导入了冷却模块

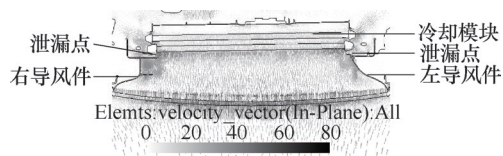


图5 优化前最大车速工况Z=0截面速度矢量图

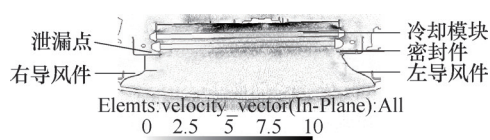


图6 优化前怠速工况Z=0截面速度矢量图

中。但在冷却模块与前端框架之间的空隙位置，可以观察到存在明显的泄漏。在怠速工况，风扇以最大功率工作，可以看到通过冷却模块的空气大部分是由风扇通过格栅吸入的冷空气，但也有部分空气是从泄漏点吸入的机舱内热空气。

根据对速度矢量图的分析，此状态的密封设计存在缺陷，需要采取措施进行优化以改善整车的散热性能。

2.密封优化后流场分析

为解决冷却模块与前端框架间的泄漏点问题，根据周边零件的结构设计了密封块，如图7所示。密封块材质为泡沫，通过过盈配合使其封住周边空隙。

图8和图9所示是增加密封块后的最大车速工况和怠速工况下速度矢量图。可以看到，在两种工况下，泄漏点均被密封件有效地封堵了，有效减少了最大车速工况下的冷空气泄漏和怠速工况的热空气回流。

表2是增加密封块前后的关键位置风量对比。对于

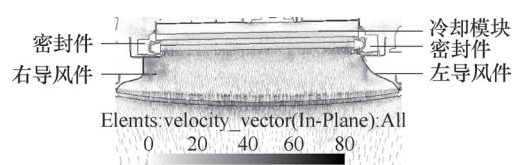


图7 冷却模块与泡沫密封件结构

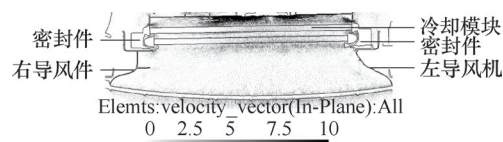


图8 优化后最大车速工况Z=0截面速度矢量图

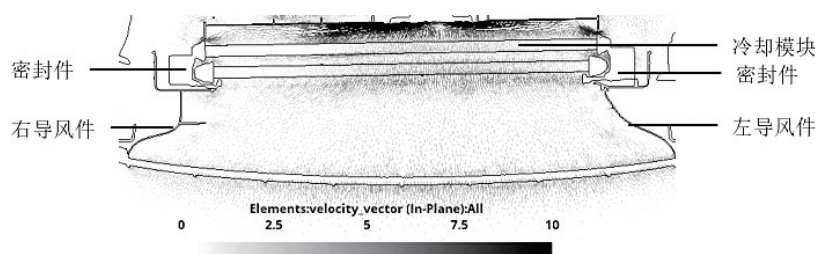


图9 优化后怠速工况Z=0截面速度矢量图

表2 密封优化前后关键位置风量对比

算例	格栅进风/ (kg/s)	主散热器/ (kg/s)	进风利用率/ 热空气回流占比 (%)
最大车速优化前	3.695	2.407	65.1
最大车速优化后	3.661	2.523	68.9
怠速优化前	0.427	0.657	35.0
怠速优化后	0.442	0.632	30.0

最大车速工况，在增加密封件后，由于前舱密封性的提升，车外空气进入发动机舱的阻力增加，所以格栅进风量下降。但由于泄漏量的减小，通过主散热器的风量提升，进风利用率提升了3.8%。

对于怠速工况，密封性提升后，热空气由风扇吸入冷却模块的阻力变大，因此通过主散热器的风量降低，但由于减少的风量来自舱内热空气，实际上对冷却性能有所优化，且由于密封性的提升，从格栅吸入的冷空气风量提升，热空气回流占比降低了5%。

结语

使用CFD手段对某SUV车型前舱流场进行模拟，通过结构检查和速度矢量图判断密封性问题后，通过泡沫密封件对其进行了密封。密封前后的关键位置风量变化显示密封措施有效。

参考文献：

[1] 胡远忠，刘传波.微型汽车冷却系统进风效率优化研究[J].机械设计与制造，2014（6）：224-226.

[2] Patidar A, Gupta U, Marathe N.Optimization of Front-End Cooling Module for a Commercial Vehicle Using a CFD Approach[C].Symposium on International Automotive Technology, 2013, DOI:

10.4271/2013-26-0044.

[3] Manna S, Kushwah Y S .Optimization of a Vehicle Under Hood Airflow Using 3D CFD Analysis[J].Sae Technical Papers, 2015.

[4] 张坤，王玉璋，杨小玉.应用CFD方法改善发动机舱散热性能[J].汽车工程，2011，33（4）：314-317，368.

[5] 朱晴，陈群，张艳芳，等.某SUV车型发动机舱CFD仿真计算与优化[J].汽车技术，2016（1）：1-5.

[6] Mathur G D.Performance Enhancement of Mobile Air Conditioning System With Improved Air Management for Front End[C]Sae World Congress & Exhibition, 2005.

[7] Kucuktopcu E C B .Evaluating the influence of turbulence models used in computational fluid dynamics for the prediction of airflows inside poultry houses[J].Biosystems Engineering, 2019，183.