

汽车空调系统蒸发器均匀性仿真及结构优化

陈佶言¹, 沈栋平¹, 王治元², 田野¹

(1. 富奥汽车零部件股份有限公司研发中心, 吉林 长春 130013; 2. 一汽东机工减振器有限公司, 吉林 长春 130013)

摘要: 蒸发器是汽车空调系统中的关键部件, 它起到制冷的作用。如果汽车空调箱体设计不合理, 就会使蒸发器出口处的风速不均匀, 导致流过空气的换热程度不同、温度不均匀, 影响驾驶的舒适性, 所以在汽车空调系统结构设计阶段就要考虑到蒸发器均匀性问题。在设计阶段利用 Ansys Fluent 软件进行 CFD 仿真分析来计算蒸发器均匀性, 可以快速判断设计方案是否达到要求, 根据 CFD 仿真结果进行结构优化, 提高蒸发器均匀性, 不仅可以提高工作效率, 还能节约大量的试验成本。

关键词: 汽车空调系统; 蒸发器均匀性; CFD; 结构优化

中图分类号: TK121 **文献标志码:** A

1 引言

随着生活水平的不断提高, 人们除了对汽车的动力性能、燃油经济性、可靠性和安全性等传统性能关注外, 对汽车驾驶舱环境舒适性的要求也变得越来越高的。汽车空调系统可有效调节车室内空气温度、湿度, 给乘员提供舒适的驾驶环境。蒸发器作为汽车空调系统中的关键部件, 其作用是来自膨胀阀的低温、低压液态制冷剂在其内部蒸发成气态。这个蒸发过程是一个强烈的吸热反应, 会吸收流经蒸发器空气的热量, 从而使空气温度下降, 达到制冷的目的。所以空气流经蒸发器芯体时的速度分布均匀程度直接影响蒸发器芯体的换热效率与各出风口的温度是否均匀, 从而影响车内人员的舒适性, 同时蒸发器表面风速不均匀分布也会降低蒸发器的换热

量, 增加能耗。在国外, Chwalowski 研究了同一蒸发器在 5 种风速分布下的性能, 结果表明风速非均匀分布引起的换热量衰减达 30%^[1]。本文针对某款汽车空调系统, 运用 CATIA 软件建立汽车空调总成的三维模型, 运用 HyperMesh 软件进行流体网格划分, 运用 Fluent 软件模拟计算汽车空调系统内部空气流动情况, 分析蒸发器出口处的风速均匀性是否符合要求, 结合试验现场蒸发器表面风速试验测定, 判断汽车空调系统结构的合理性。

2 数值计算模型

2.1 汽车空调系统数值计算模型构成及网格划分

汽车空调系统数值计算模型的结构主要包括进气端、空调壳体、鼓风机、蒸发器、暖风芯体、温度风门、吹

面风门、吹脚风门和除霜风门等结构。利用 CATIA 软件建立的汽车空调总成三维模型，在 HyperMesh 软件进行流体域的提取，由于模型结构较为复杂，考虑到模型处理的难度及求解效率等因素，在不影响计算精度的前提下对几何模型细节进行了简化处理。主要是去除对分析结果影响不大的结构及不需要的特征^[2]，但是对于类似鼓风机、蒸发器、暖风芯体等核心部件结构尺寸要保持原始的几何状态。具体步骤如下：

1) 使用 CATIA 软件建立汽车空调系统总成三维模型；

2) 将 HVAC (Heating, Ventilating, and Air Conditioning, 供热、通风和空气调节系统) 箱体和蒸发器、暖风芯体、蒸发箱和鼓风机等三维数据模型导入 HyperMesh 软件中提取流体域，对于三维模型中结构相对复杂的区域，忽略其次要特征，保留对流场影响大的主要特征。对流体域表面进行光顺处理，删除那些对 CFD (Computational Fluid Dynamics, 计算流体动力学) 分析计算影响不大的结构，去除 $R < 0.5 \text{ mm}$ 的圆角，将 HVAC 箱体、蒸发器、蒸发器箱体三者之间进行简化连接，形成一个封闭的空间计算面域；

3) 在 HyperMesh 软件中对所提取的流体区域进行网格划分，汽车空调系统网格要保证均匀连续、过渡平缓、外形美观。HVAC 箱体、蒸发箱、鼓风机采用四面体划分网格，网格尺寸为 $1.5 \sim 6 \text{ mm}$ 。蒸发器、暖风芯体采用六面体划分网格，网格尺寸为 4 mm ；

4) 修复表面网格错误、调整表面网格质量，生成体网格，对于一些重点关注的区域，比如鼓风机及 HVAC 箱体速度梯度大的位置进行局部加密，以保证 CFD 分析计算精度，如图 1 所示。

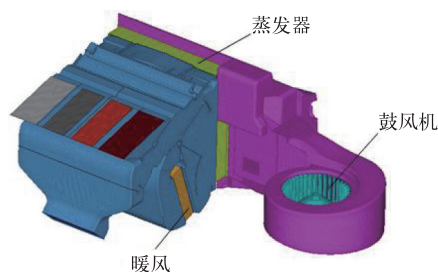


图 1 汽车空调系统流体域网格 (吹面全冷模式)

2.2 边界条件及计算策略

计算工况及物理模型如下：

- 1) 计算流体介质为空气，环境温度 25°C ；
- 2) 流体在空调箱体内的流动视为绝热的不可压缩湍流，不考虑重力与温度的影响；
- 3) 采用标准的 $k-\varepsilon$ 湍流模型模拟湍流；
- 4) 采用标准壁面方程模拟近壁面处的流动；
- 5) 流动为稳态流动 (速度、压力、温度等物理量不随时间变化)；
- 6) 在处理汽车空调系统中风机部分时，本文采用了多重坐标参考系的方法来处理该区域的流体。鼓风机转速 3000 r/min ，设置入口为质量流量入口，流量为 0.164949 kg/s ，出口为压力出口；

7) 采用 simple 算法耦合计算域的压力和速度。在计算求解过程中，对于动量方程、湍动能和耗散率的离散都采用二阶迎风离散格式。

蒸发器和暖风芯体由管路与散热带组成，这种结构直接影响蒸发器的换热性能与附近空气的流动，并起到一定程度的压降作用。在 CFD 仿真分析计算过程中需要把蒸发器与暖风芯体简化成多孔介质，多孔介质模型有着非常广泛的应用，可用于模拟过滤器、通风管道、催化反应器、多孔板和管束系统等。CFD 仿真分析计算使用多孔介质模型时，多孔介质将运用于网格区域，流体通过多孔介质的压降和输入条件有关。

多孔介质在建模时被简化为一个动量源项附加在标准流动方程上。该源项包含两部分内容：粘性损失项及惯性损失项。可表示为

$$S_i = \sum_{j=1}^3 D_{ij} \mu v_j + \sum_{j=1}^3 C_{ij} \frac{1}{2} \rho |v| v_j \quad (1)$$

式中， S_i 为第 i (x, y, z) 个动量方程； $|v|$ 为速度值； D_{ij} 及 C_{ij} 为指定的矩阵。式中右边第一项为粘性损失，第二项为惯性损失。此方程可以写成简化形式

$$S_i = -\left(\frac{\mu}{\alpha} v_i + C_2 \frac{1}{2} \rho |v| v_i\right) \quad (2)$$

式中， α 为渗透率， C_2 为惯性阻力系数。因此可以指定对角矩阵 D 及 C 为 $\frac{1}{\alpha}$ 与 C_2 。

根据蒸发器和暖风芯体的单体风阻试验数据、几何尺寸换算出蒸发器和暖风芯体的粘性阻尼，以及惯性阻尼系数。蒸发器与暖风芯体单体风阻实验曲线如图 2 和图 3 所示。

2.3 蒸发器均匀性分析工况

由于吹面模式是汽车空调中最常使用的模式，在夏天制冷情况下蒸发器出口处风速的均匀性会直接影响着

各出风口处的温度，如果各出风口处温差太大，就会使车舱内环境的舒适度下降。所以本计算案例研究汽车空调系统在吹面全冷模式下的蒸发器均匀性。

吹面全冷模式下风门情况如图4所示，吹面风门开启，吹脚风门、除霜风门、温度风门处于关闭状态。

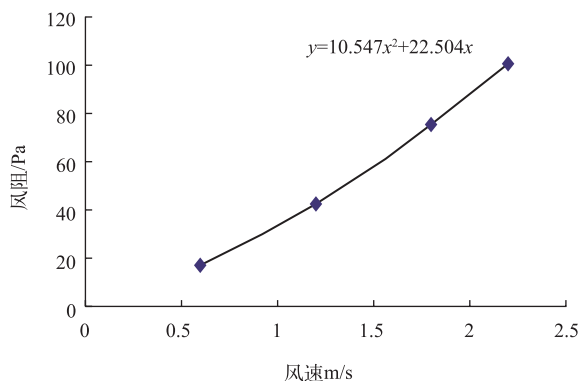


图2 蒸发器风阻试验数据

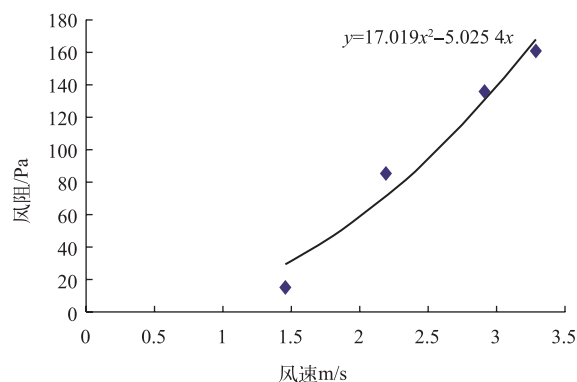


图3 暖风芯体风阻试验数据

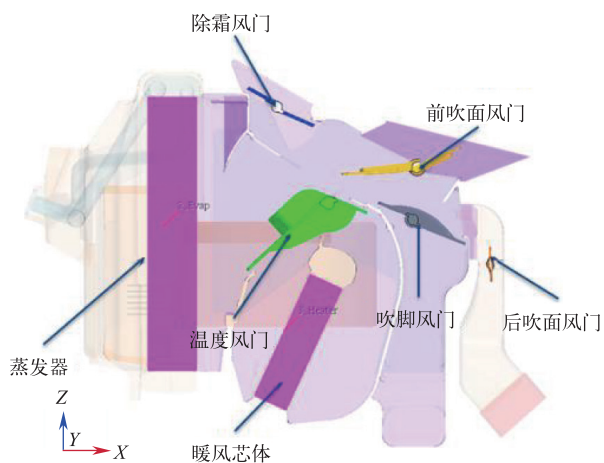


图4 吹面全冷模式风门位置示意

2.4 流场分布

空气由空调进气端进入汽车空调系统，经鼓风机加速流向蒸发器、HVAC 箱体，从出风口流出，如图5所示，为了便于更加清楚地了解汽车空调内部空气的流动状态，在空调箱体的中间部位做了截面并绘制矢量图，如图6所示。

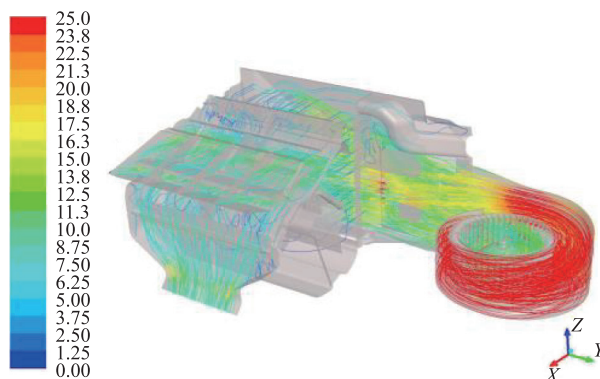


图5 空调系统内部流线图

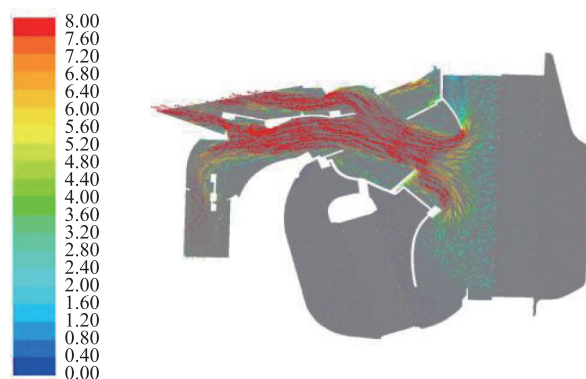


图6 HVAC 箱体中间部位截面风速矢量图

2.5 流蒸发器均匀性 CFD 分析

空气流经蒸发器芯体时的速度分布会直接影响蒸发器的换热效率。空气流经蒸发器速度不均匀时不仅会导致蒸发器换热量降低，而且还降低了蒸发器的换热效率、增加鼓风机功率，最终影响乘员舱的舒适性^[3]。因此要尽可能地保证空气流经蒸发器芯体时速度分布的均匀性，以提高蒸发器芯体的换热效率及乘客的舒适性。为了观察蒸发器均匀性的仿真结果，选取蒸发器厚度方向上的中间位置做截面，截面位置如图7所示。查看此截面上的空气速度分布，可反映出蒸发器的均匀性，如图8所示。

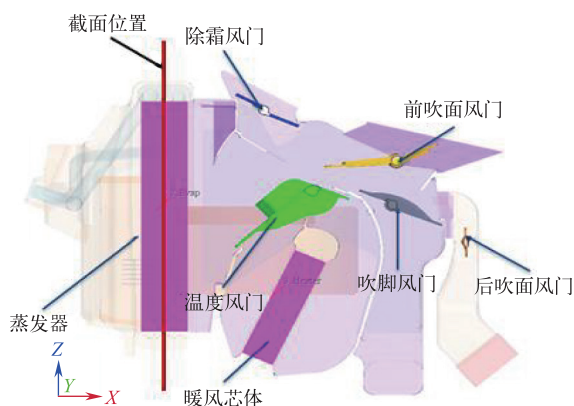


图7 蒸发器截面位置

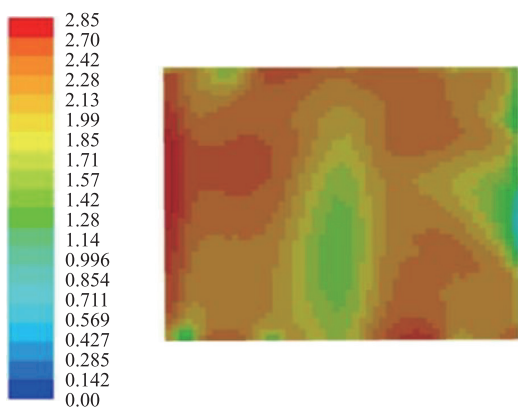


图8 蒸发器风速云图

如何客观定量地评价蒸发器均匀性是一个关键问题，通过以往的仿真分析经验与试验数据对比，发现利用 KPI (Key Parameter Index, 关键参数指标) 表征换热器表面风速的均匀程度能很好地反映出蒸发器的均匀程度，计算公式如下：

$$KPI_{-10} = \frac{\text{Area of the location between } \pm 10\% \text{ average velocity}}{\text{Total area}_{\text{plane}}} \quad (3)$$

$$\geq 50\%$$

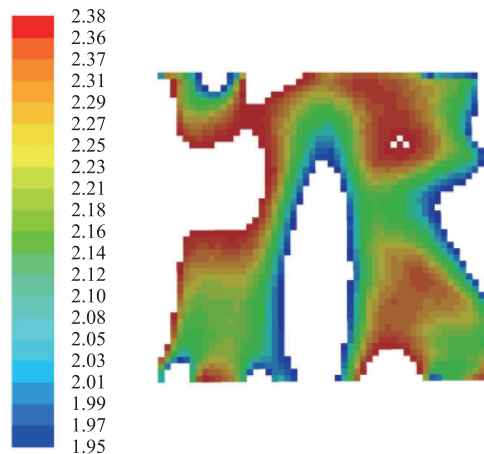
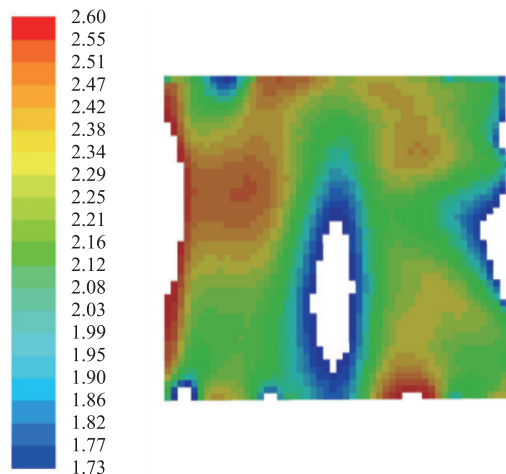
$$KPI_{-20} = \frac{\text{Area of the location between } \pm 20\% \text{ average velocity}}{\text{Total area}_{\text{plane}}} \quad (4)$$

$$\geq 80\%$$

由上面的计算公式可以看出截面平均风速 $\pm 10\%$ 范围内面积占比大于等于 50%，平均风速 $\pm 20\%$ 范围内面积占比大于等于 80%，可视为蒸发器的均匀性较好，设计达到要求。此汽车空调蒸发器 KPI 仿真计算结果如图 9、图 10 所示。

由 CFD 仿真计算结果可以看出，蒸发器 $KPI_{-10} = 64.73\% > 60\%$ ， $KPI_{-20} = 87.09\% > 80\%$ ，满足要求，蒸发器的均匀性较好。但为了提高产品的市场竞争力及驾驶舱

的舒适性，就要对蒸发器均匀性有更高的要求，通过对汽车空调进行结构优化，改善汽车空调内部流场，提高蒸发器 KPI_{-10} 及 KPI_{-20} 的数值。


图9 蒸发器界面 $KPI=64.73\%$

图10 蒸发器界面 $KPI=87.09\%$

3 结构优化

3.1 蒸发器箱体结构优化

汽车空调箱体的结构直接影响着蒸发器的均匀性，其中蒸发器箱体（如图 11 所示）的结构影响最大，因为蒸发器箱体起到了压风及改变空气流线的作用。选取蒸发器箱体截面，观察蒸发器箱体界面速度矢量图，如图 12 所示。

图 12 可看出，蒸发器箱体入口位置产生了明显涡流，造成流动损失，流动阻力增大，同时涡流也改变了空气的流动方向，从而影响了蒸发器的均匀性。优化蒸发器箱体结构，减小空气流动方向的突变，使空气流动光滑、

平顺，提高蒸发器均匀性。

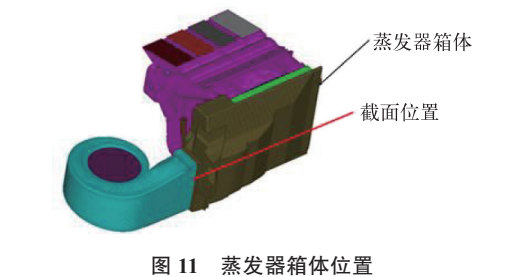


图 11 蒸发器箱体位置

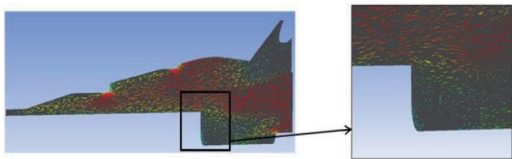


图 12 蒸发器箱体截面速度矢量图

根据流体力学基本理论，结合 CFD 仿真分析计算，对蒸发器箱体结构进行优化设计，最大限度地减小截面突变和空气流动方向突变造成的流动涡流^[4]。按照此优化设计理论，在不影响产品结构强度及不增加模具制造成本的前提下，对蒸发器箱体结构进行优化改进，圆滑过渡产生涡流结构位置的转角，并缩短压风部位，调整蒸发器截面风速分布。优化效果如图 13 所示。

3.2 结构优化 CFD 分析

重新划分蒸发器箱体网格并替换旧的蒸发器箱体网格，CFD 分析边界条件及计算策略不变，提交分析重新

计算，查看蒸发器箱体截面速度矢量，优化后的蒸发器箱体截面速度矢量图如图 14 所示，通过优化蒸发器箱体结构，增加圆角及平滑过渡，减小了流动过程中的方向突变，消除了原风结构的流动涡流，减小了流动阻力，使流动更加顺畅^[5]。

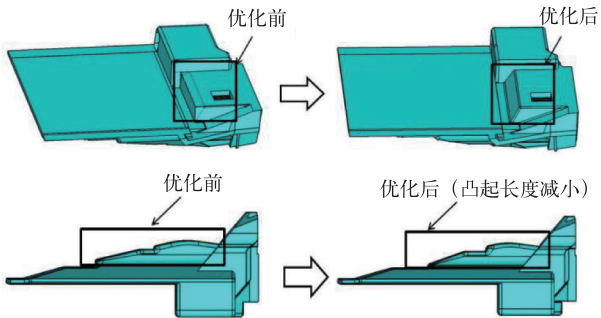


图 13 蒸发器箱体结构优化

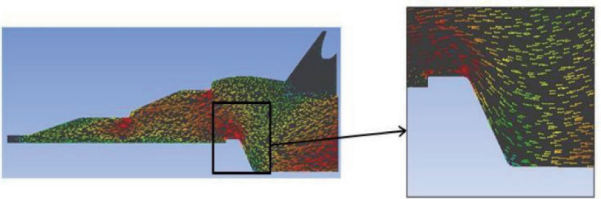


图 14 蒸发器箱体截面速度矢量图

分别计算出优化后蒸发器截面平均风速 $\pm 10\%$ 与 $\pm 20\%$ 范围内面积占，优化后的汽车空调蒸发器 KPI 计算结果见表 1。

表 1 优化后蒸发器 KPI

优化后蒸发器风速云图		KPI=68.87%	KPI=90.36%
蒸发器 截面			
	<div><div>2.75</div><div>2.61</div><div>2.47</div><div>2.34</div><div>2.20</div><div>2.06</div><div>1.92</div><div>1.79</div><div>1.65</div><div>1.51</div><div>1.37</div><div>1.24</div><div>1.10</div><div>0.962</div><div>0.824</div><div>0.687</div><div>0.550</div><div>0.412</div><div>0.275</div><div>0.137</div><div>0.00</div></div>	<div><div>2.38</div><div>2.36</div><div>2.34</div><div>2.32</div><div>2.30</div><div>2.27</div><div>2.25</div><div>2.23</div><div>2.21</div><div>2.19</div><div>2.17</div><div>2.14</div><div>2.12</div><div>2.10</div><div>2.08</div><div>2.06</div><div>2.04</div><div>2.01</div><div>1.99</div><div>1.97</div><div>1.95</div></div>	<div><div>2.60</div><div>2.56</div><div>2.51</div><div>2.47</div><div>2.43</div><div>2.38</div><div>2.34</div><div>2.30</div><div>2.25</div><div>2.21</div><div>2.17</div><div>2.12</div><div>2.08</div><div>2.04</div><div>1.99</div><div>1.95</div><div>1.91</div><div>1.86</div><div>1.82</div><div>1.78</div><div>1.73</div></div>

由优化后模型的 CFD 仿真计算结果可以看出，优化后的蒸发器 KPI_{10} 由原来的 64.73% 增长到 68.87%，蒸发器 KPI_{20} 由原来的 87.09% 增长到 90.36%，蒸发器均匀性得到了显著提升，蒸发器箱体结构优化起到了预想的效果。

4 试验验证

为了验证仿真结果准确度及结构优化效果，对蒸发器进行试验测量。在试验前将蒸发器表面均匀划分 6×5 共 30 个网格区域，以全面反映风速分布情况，每个网格

的四个边点位置为测点并安装风速传感器,如图 15 所示。风速传感器用于实时、准确地测量蒸发器各区域的出风风速,是评估蒸发器风速均匀性的关键设备。通过风速传感器获取的数据,可以分析蒸发器在不同位置或条件下的风速分布情况,进而评估蒸发器的性能和设计合理性。

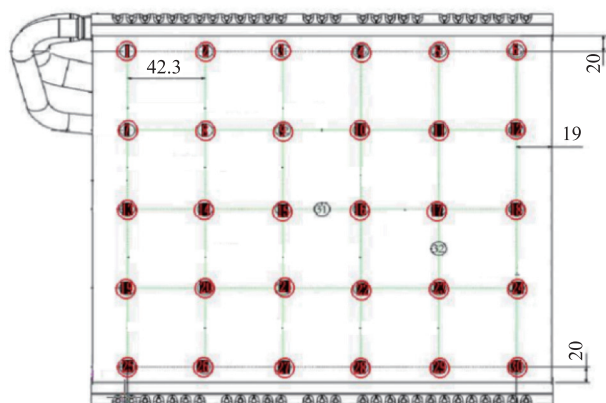


图 15 蒸发器试验风速测点布置图

测试在标准的汽车空调试验室进行,室内干/湿温度为 26.98/19.36℃,进口湿气密度 1.131kg/m³,鼓风机转速 3 000r/min,试验风量 500m³/h。每个网格有四个测点,四个测点的风速平均值为网格的结果风速,并用不同颜色标出。试验得出的风速分布见表 2。

表 2 蒸发器试验测点网格风速图

工况 500m ³ /h		MIN	MAX	AVER	
		1.79	2.51	2.19	
2.42	2.12	2.23	2.25	2.32	2.21
2.45	2.45	2.13	2.29	2.45	2.09
2.51	2.45	1.93	1.98	2.35	1.91
2.32	2.21	1.98	1.96	2.29	2.01
1.93	2.05	1.79	1.89	2.41	2.31

通过测点风速得出蒸发器平均风速为 2.19m/s,利用公式 (3)、(4) 得出 $KPI_{10}=65.56\%$ 、 $KPI_{20}=88.23\%$ 。可以看出,汽车空调在 500m³/h 风量条件下蒸发器风速均匀性试验与仿真值相比最大误差为 3.31%,在工程合理的误差范围以内,试验结果与仿真结果相吻合,证明仿真结果可以作为汽车空调蒸发器均匀性结构优化的理论依据^[6]。

5 结束语

蒸发器作为汽车空调系统中的关键部件,空气流经蒸发器芯体时的速度分布均匀程度直接影响蒸发器芯体的换热效率与各出风口的温度是否均匀,从而影响车内人员的舒适性。本文利用 CFD 仿真方法分析某车型汽车空调系统的蒸发器均匀性,并根据 CFD 仿真结果找出影响蒸发器均匀性的结构区域,该区域产生了明显涡流,造成流动损失,流动阻力增大,降低了蒸发器的均匀性。优化蒸发器箱体结构,消除了空气流动产生的涡流,减小了空气流动方向的突变及流动阻力,使空气流动变得更加光滑顺畅,并使蒸发器 KPI_{10} 与 KPI_{20} 分别提升了 4.14% 和 3.27%,提高了车内环境的舒适性。仿真结果与蒸发器均匀性试验进行对比,最大误差为 3.31%,进一步验证了仿真分析的有效性,由此可见在设计阶段利用 Fluent 仿真软件进行 CFD 仿真分析来计算蒸发器均匀性,可以快速的判断设计方案是否达到要求,并及时作出优化,缩短了汽车空调的设计和生周期,同时提高了产品质量和产品竞争力,在激烈的市场竞争中能够赢得优势,支撑产品订单获取,为公司创造更高的效益。

参考文献

- [1] CHWALOWSKI M, DIDION D A, DOMANSKI P A. Verification of evaporator computer models and analysis of performance of an evaporator coil[J]. ASHRAE Transactions, 1989, 95 (1): 1229-1236.
- [2] 张传英,张继业. 基于仿生形态的高速列车气动性能研究[J]. 机械, 2019 (4): 42-47.
- [3] 柳成文,王冬青,龚建英. 风速分布不均匀性对空气源热泵换热性能的影响[J]. 制冷与空调, 2008, 8 (3): 87-90.
- [4] 王良柱,张蒙,徐静. 基于 Fluent 的汽车空调风道仿真及结构改进[J]. 机械, 2021, 48 (1): 30-36.
- [5] 许振华,祖润青,吴远培,等. HVAC 蒸发器芯体流动均匀性及空调流道设计的研究[J]. 中国新技术新产品, 2016 (2): 13-14.
- [6] 朱信达,苏林,高浩,等. 电动汽车 HVAC 模块制热模式风量分配特性研究[J]. 轻工机械, 2020, 38 (6): 33-39.

收稿日期: 2024-07-19