

基于神经网络的汽车空调送风格栅角度优化与乘员舱降温性能改进

冯英, 祁祺, 李小华, 黄晖, 余显忠

(江铃汽车股份有限公司 产品研发总院, 南昌 330200)

摘要: 围绕汽车乘员舱降温性能下的吹脸速度指标, 针对格栅风口叶片位置参数, 搭建了同时考虑主驾驶侧吹脸流速性能和副驾驶侧吹脸流速性能的多目标优化自动设计流程。基于CFD仿真和多学科优化设计平台, 采用拉丁超立方采样方法设计样本点, 获取DOE矩阵, 利用神经网络建立代理模型, 进行吹脸流速性能参数预测, 使用第三代非支配性排序遗传算法(NSGA-III)获得多目标优化问题的帕累托前沿图。优化后的格栅叶片位置最高能使主驾驶侧呼吸面速度提升109.1%, 副驾驶侧呼吸面速度提升137.5%。对优化前后的方案进行温度场瞬态仿真和乘员降温性能试验, 验证了其优化结果的可靠性。

关键词: 汽车空调; 降温性能; 多目标优化; 神经网络代理模型

中图分类号: TH138; U469.5 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.2095-1469.2025.02.06

Neural Network-Based Optimization of Air Conditioning Supply Grille and Cabin Cooling Performance in Vehicles

FENG Ying, QI Qi, LI XiaoHua, HUANG Hui, YU Xianzhong

(R&D Center, Jiangling Motors Co., Ltd., Nanchang 330200, China)

Abstract: A multi-objective optimized automatic design process is developed based on the airflow velocity required for cooling performance in the passenger cabin. This process considers the airflow performance on the driver's side and the passenger's side, focusing on the positioning of the grille vent blades. Based on CFD simulations and a multi-disciplinary optimization design platform, the Latin hypercube sampling method is used to generate sample points and construct the DOE matrix. A neural network-based proxy model is then built to predict the blow-face airflow velocity performance parameters. The NSGA-III algorithm is used to obtain the Pareto frontier diagram for the multi-objective optimization problem. The optimized grille blade position increases the airflow speed by 109.1% on the driver's side and by 137.5% on the front passenger's side. The reliability of the optimization results is verified through unsteady CFD simulations and cooling performance tests before and after the optimization.

Keywords: vehicle air conditioning; cooling performance; multi-objective optimization; neural network proxy model

收稿日期: 2024-09-13 改稿日期: 2024-12-02 网络首发日期: 2024-12-16

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFB2503505): 电动载货车多材料底盘结构轻量化关键技术开发

参考文献引用格式:

冯英, 祁祺, 李小华, 等. 基于神经网络的汽车空调送风格栅角度优化与乘员舱降温性能改进[J]. 汽车工程学报, 2025, 15(2): 177-186.

FENG Ying, QI Qi, LI XiaoHua, et al. Neural Network-Based Optimization of Air Conditioning Supply Grille and Cabin Cooling Performance in Vehicles[J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2025, 15(2): 177-186. (in Chinese)



汽车空调系统的主要作用是对车厢进行温度、湿度等的调节,保证车厢内冬暖夏凉,使乘员感觉舒适,减少旅途疲劳,更好地保障身体健康和驾驶安全。假设车内空调系统设计欠佳,出风口位置、气流速度等参数不协调,则不能很好地给乘员提供良好的空调性能。想要获取较好的车厢空调性能,必须考虑车内的流场分布,关注空调出风口的送风方向、大小、位置等参数。

目前,行业内关于空调出风口对汽车空调性能影响的研究已经日趋成熟,主要集中在出风口气流参数(速度、温度、角度)^[1-2],以及出风口几何参数(尺寸、位置)^[3-7]方面,其中,出风口角度对乘员舱空调性能有较大影响^[8],通过调节送风格栅角度,使乘员呼吸点气流均衡。

唐江明等^[9]通过出风口格栅的参数化建模,使用DOE建立响应面的方法对某轿车空调性能进行了优化设计。曹凡等^[10]以某房车空调系统送风温度、速度和角度等参数为输入,以房车内部部件的热流量为目标,基于iSight及Fluent,使用响应面的方法对目标进行优化。Li Nan等^[11]对长途高速铁路列车通风系统进行了基于粒子群优化算法的多目标设计,以保证热舒适性、空气质量以及减少系统能耗。张喜清等^[12]对装载机驾驶室内部流场进行分析,利用iSight平台,采用径向基函数(RBF)神经网络代理模型,结合遗传算法,研究了空调送风参数对座椅区域热流量的影响。

综上所述,相关学者已经针对汽车空调性能的优化开展了广泛而深入的研究,但同时考虑不同出风口对驾驶员与副驾驶乘员的影响,并以此为目标进行空调性能优化的案例尚未发现。

本文以某SUV为主要研究对象,研究乘员舱的吹脸降温模式,对该模式下的流速性能进行研究,针对空调出风口格栅角度与主驾驶侧呼吸面速度、副驾驶侧呼吸面速度关系的多目标优化特征,通过建立多目标自动优化流程,设计DOE矩阵,建立神经网络代理模型,获取帕累托(Pareto)前沿解集,进行优化设计,同时进行乘员舱降温性能研究。

1 模型选择与优化流程

1.1 模型选择

将某SUV车型的空调吹脸降温开到最大制冷模式,保留乘员舱内座椅、方向盘、仪表台等驾驶舱部件,所使用的模型如图1和图2所示。

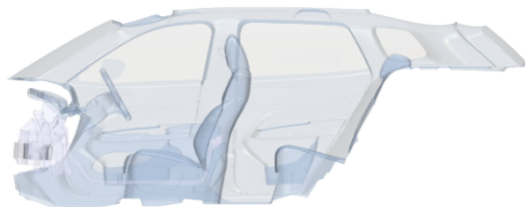


图1 吹脸模式下乘员舱几何模型

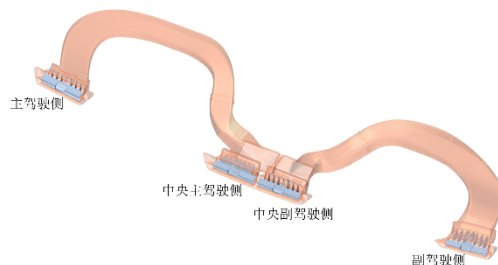


图2 吹脸风道及格栅

1.2 空调吹脸流速性能优化流程

本研究的目的是通过对吹脸出风口格栅叶片的角度进行参数化,搭建流程自动运行平台,控制吹脸出风口吹向呼吸面的气流速度和气流方向,从而达到最佳流速性能。基于此目的,建立空调吹脸流速性能优化流程,如图3所示。

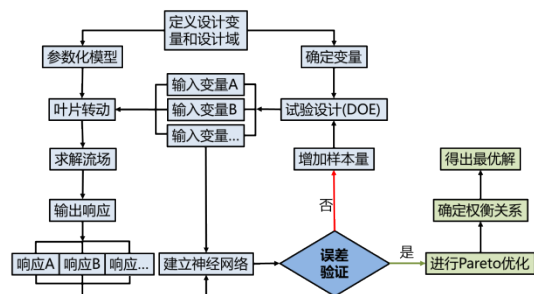


图3 空调吹脸流速性能优化流程

2 基础模型的CFD仿真

2.1 计算域确定

导入包含乘员舱、风管系统、格栅叶片的模型

到 Starccm+ 软件；使用包面 (wrapper) 的方法建立乘员舱复杂几何模型；风管系统与格栅叶片之间通过布尔减操作形成一个几何结构。为了保证在后续优化过程中，减少多余的网格划分操作，在风管系统、格栅布尔减操作后的几何和乘员舱之间建立交界面 (interface)，保证格栅发生变化时，乘员舱网格不会再次划分。

2.2 网格划分

多面体网格能更精确地计算控制体的梯度，更适合内流场计算。本模型中采用多面体网格进行网格的划分。设置边界层层数为2层，在乘员舱区域第1层边界层厚度设置为2.5 mm，在叶片区域第1层边界层厚度设置为0.5 mm；设置全局面网格尺寸为4~6 mm，格栅叶片及鼓风机区域加密为0.5~1 mm；为了保证该区域的流场特征，对格栅叶片区进行体网格加密，加密尺寸为1 mm。最终整个计算域生成体网格2 800万个。计算域纵剖面整车网格如图4所示，格栅叶片区域网格如图5所示。

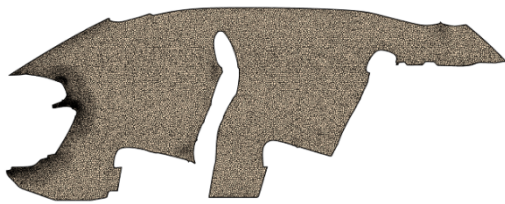


图4 计算域纵剖面网格

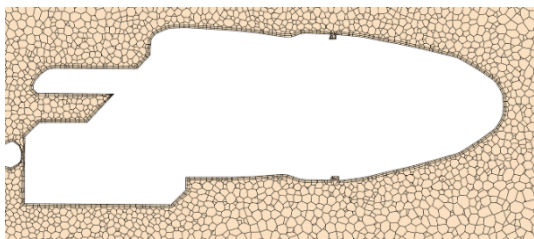


图5 出风口格栅叶片区域网格

2.3 求解计算

在计算域中建立监控呼吸面，设定主、副驾驶面平均速度为监控值；选取 Realizable K-Epsilon Two-Layer 湍流模型进行稳态求解，鼓风机使用移动参考系 (Moving Reference Frames, MRF) 方法进行模拟，根据最大制冷试验的总风量需求，鼓风机转速设置为3 100 r/min。

2.4 结果分析及目标指定

呼吸面速度云图如图6所示，主、副驾驶呼吸面平均速度均较差；主驾驶侧呼吸面平均速度为1.1 m/s，副驾驶侧呼吸面平均速度为0.7 m/s；对于使主、副驾驶侧呼吸面的平均速度达到1.8 m/s以上的目标（依据企业标准设置）而言，基础状态是比较差的。流场迹线图如图7所示，可以发现不同出风口之间的迹线互相影响，通过调节单一出风口的格栅叶片角度无法获得较好的流场结果。

基于以上结果，研究调节各个出风口格栅的叶片角度，进而改变迹线轨迹，改善呼吸面的速度分布，使主、副驾驶侧的呼吸面平均速度均达到目标。

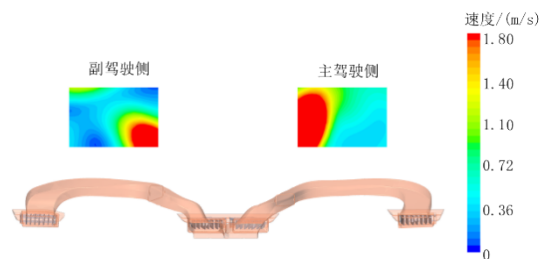


图6 基础模型呼吸面速度分布云图



图7 基础模型出风口迹线图

3 多目标下的吹脸流速性能优化

3.1 参数化建模

依据基础模型对吹脸风管系统内的风口格栅进行参数化建模，主要方法是改变各格栅叶片的角度，实现叶片的自由旋转驱动模型变动，满足设计变量在设计域内的连续可变。

3.2 多目标优化流程搭建

参考图 2 所示的优化设计流程, 建立多参数、多目标的吹脸流速性能优化流程, 主要步骤如下: 基于已完成的 CFD 基础计算模型, 建立 4 个出风口横向联动和竖向联动的叶片角度共计 8 个设计变量; 建立主驾驶侧呼吸面平均速度、副驾驶侧呼吸面平均速度 2 个设计目标; 通过对每一种设计变量组合驱动 CFD 模型参数化变形及仿真的求解计算, 得到对应的主、副驾驶侧呼吸面的平均速度; 基于 DOE 结果建立神经网络代理模型; 最后, 基于神经网络代理模型预测结果, 使用遗传算法, 得到多目标优化问题的帕累托前沿解。

3.3 试验设计 (DOE)

DOE 选取直接影响呼吸面速度的格栅叶片角度作为优化设计变量, 合计 8 组变量。

图 8 为主驾驶侧格栅叶片几何图, 分别含横向和竖向两组叶片, 其旋转轴如虚线所示。横向下层叶片属于隐藏式叶片, 进行联合转动时, 气流出风夹角与传统方式存在差异, 其转动范围的确定会基于经验进行考量。

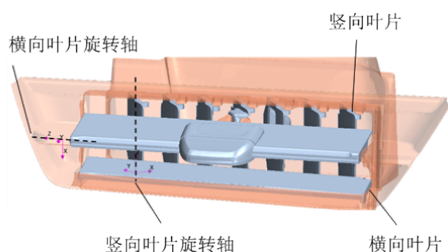


图 8 主驾驶侧格栅叶片几何图

竖向叶片的旋转角度范围依据其对呼吸面边界的描线覆盖, 其示意图及旋向如图 9a、b 所示, 其取值范围为 $0\sim 20^\circ$; 横向叶片参考其隐藏式平动双层叶片的几何特征, 示意图及旋向如图 9c、d 所示, 其取值范围为 $0\sim 20^\circ$ 。定义主驾驶侧和副驾驶侧呼吸面平均速度变量符号为 AVE_V_FL 和 AVE_V_FR; 主驾驶侧竖向和横向叶片变量符号为 Grille LV 和 Grille LH, 中央主驾驶侧竖向和横向叶片变量符号为 Grille MLV 和 Grille MLH, 中央副驾驶侧竖向和横向叶片变量符号为 Grille MRV 和 Grille MRH, 副驾驶侧竖向和横向叶片变量符号为 Grille RV 和 Grille RH。



图 9 出风口叶片旋转角度范围

使用拉丁超立方采样方法^[13]在 8 组变量的样本空间中随机抽取 100 个样本点, 通过自动化流程, 计算得到 DOE 矩阵。

3.4 神经网络代理模型

神经网络由输入层、隐藏层和输出层共 3 层构成, 其基本结构如图 10 所示。本文的神经网络代理模型根据 DOE 矩阵得到的 100 个样本点, 选取 80% 的样本进行训练, 20% 的样本进行验证, 设置 2 层隐藏层, 每层设置 10 个神经元, 进行数据训练, 进而完成神经网络代理模型的搭建。

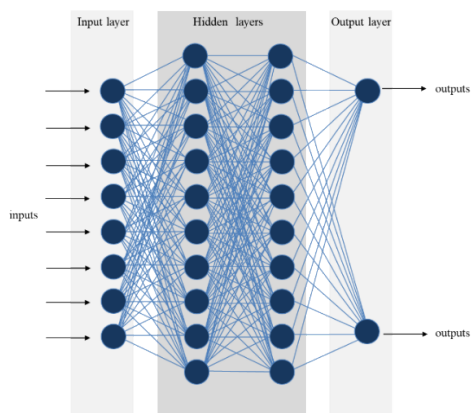


图 10 神经网络基本结构

为检验代理模型的预测精度, 在设计域中任意选取 3 个点进行预测值和仿真值对标, 样本点位置参数和数值对比结果见表 1 和表 2, 结果显示预测误差在 4% 以内, 说明代理模型预测精度较好, 可用于后续优化设计。

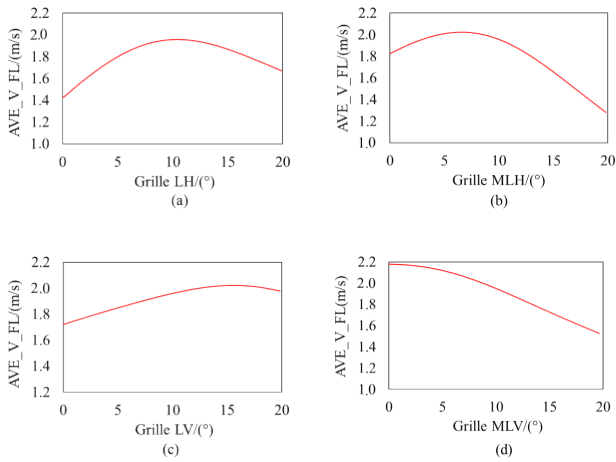


图 11 主驾驶侧呼吸面平均速度随各设计变量的变化

图 12 表示副驾驶侧各单一变量与副驾驶侧呼吸面速度大小的非线性关系。图中曲线显示在取值范围内，副驾驶侧和中央副驾驶侧的竖向和横向叶片均有满足速度目标的最优转角。副驾驶侧竖向叶片 13.7° 时，副驾驶侧呼吸面速度达到最大，中央副驾驶侧竖向叶片转到最极值时，副驾驶侧呼吸面速度达到最大，副驾驶侧横向叶片 11.8° 时，副驾驶侧呼吸面速度达到最大，中央副驾驶侧横向叶片 9.8° 时，副驾驶侧呼吸面速度达到最大。

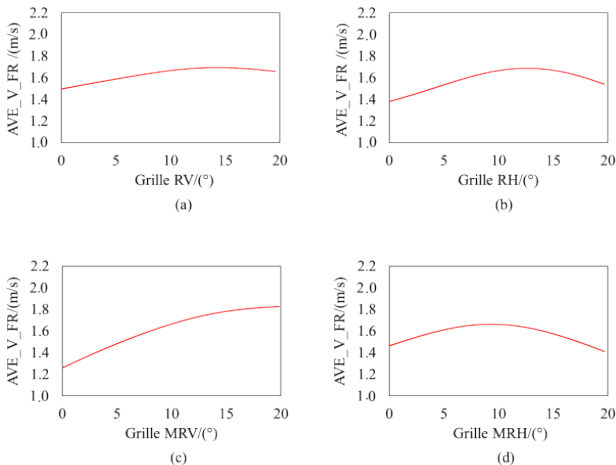


图 12 副驾驶侧呼吸面平均速度随各设计变量的变化

图 13 a、b 为副驾驶侧变量与主驾驶侧呼吸面速度大小的非线性关系，图 13c、d 为主驾驶侧变量与副驾驶侧呼吸面速度大小的非线性关系，由图可知，各出口之间是相互影响的。可见研究 8 组格栅

角度与主、副驾驶呼吸面速度大小之间关系的必要性。

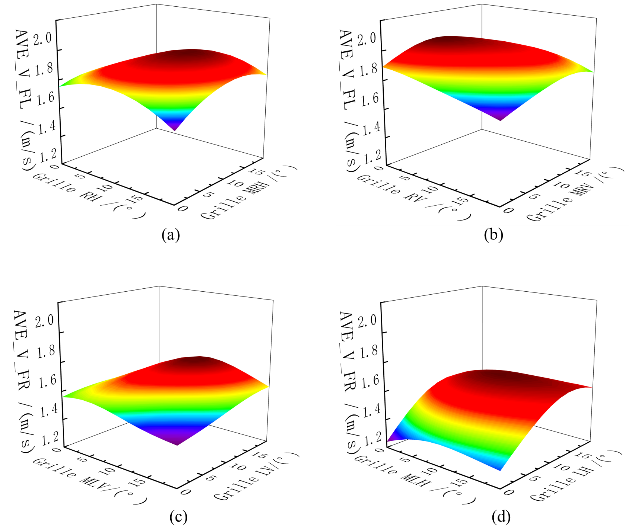


图 13 主、副驾驶侧呼吸面平均速度随各设计变量的变化

3.5 优化问题求解与结果分析

本文吹脸流速性能优化的目标是同时让主、副驾驶侧呼吸面的平均速度达到 1.8 m/s 以上（依据企业标准设置）。基于神经网络代理模型，使用 NSGA III^[14] 求解式 (1) 所示的以格栅叶片转角为优化变量，主、副驾驶侧呼吸面平均速度为目标的优化问题。

$$\left\{ \begin{array}{l} \max(\text{AVE_V_FL}, \text{AVE_V_FR}), \\ \text{s.t.} \\ \text{AVE}_{V_{\text{FL}}} \geq 1.8 \text{ m/s}, \\ \text{AVE}_{V_{\text{FR}}} \geq 1.8 \text{ m/s}, \\ 0^\circ \leq \text{Grille L/H} \leq 20^\circ, \\ 0^\circ \leq \text{Grille MLV/H} \leq 20^\circ, \\ 0^\circ \leq \text{Grille MRV/H} \leq 20^\circ, \\ 0^\circ \leq \text{Grille RV/H} \leq 20^\circ. \end{array} \right. \quad (1)$$

将 DOE 结果中的设计点作为初始样本点进行优化迭代，迭代 2 684 代后，寻优过程收敛，其求解过程如图 14 所示。

寻优收敛后求解得到吹脸流速性能的多目标优化问题的帕累托前沿，如图 15 所示。由图可知，主驾驶侧呼吸面速度与副驾驶侧呼吸面速度之间的关系为不协同关系，当一个指标达到最优时，另一个指标无法达到最优，可见对吹脸流速性能进行多目标优化是非常必要且有效的。

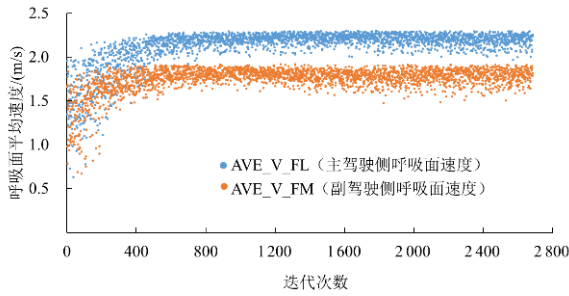


图 14 寻优过程

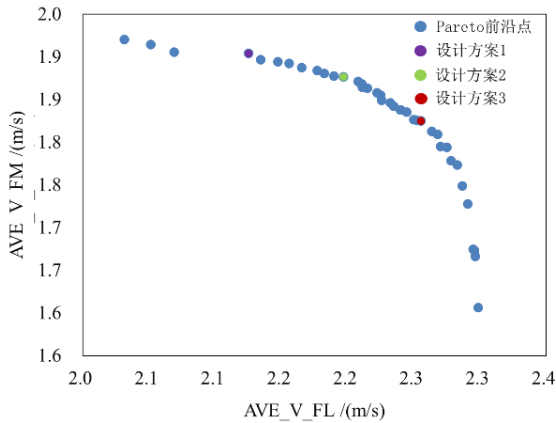


图 15 吹脸流速性能优化问题帕累托前沿

图 15 标识了帕累托前沿最优解集，主、副驾驶侧呼吸面同时满足 1.8 m/s 以上的速度均为满足目标的解集。选取解集中 3 个比较优秀的解，对应图中设计方案 1、2、3，分布在两端和拐点位置，并与基础状态进行对比，点设计参数见表 4，提升比例如图 16 所示，可以发现：优化后的 3 个设计方案最高使主驾驶侧呼吸面速度提升 109.1%，副驾驶侧呼吸面速度提升 137.5%。方案 2 和方案 3 的叶片转角过渡较小，主驾驶侧竖向叶片微调 1.1°，中央主驾驶侧竖向叶片微调 1.1°，带来 4.5% 的主驾驶侧呼吸面速度变化；副驾驶侧竖向叶片微调 1.1°，也带来 4.5% 的副驾驶侧呼吸面速度变化，可见格栅叶片转角调节幅度对呼吸面速度非常敏感。

图 17 和图 18 为 3 个达标方案解与基准的呼吸面速度云图和迹线图，通过对比，可以发现 3 组优化方案的出风口气流经过叶片调节，冲击区域集中在呼吸面，使主、副驾驶侧呼吸面速度显著提高，满足目标。

表 4 典型最优设计参数

方案	基准	方案 1	方案 2	方案 3
Grille LV/(°)	0	12.7	12.7	11.6
Grille LH/(°)	0	-7.0	-7.0	-7.0
Grille MLV/(°)	0	-8.1	-10.3	-11.4
Grille MLH/(°)	0	-5.2	-5.2	-7.7
Grille MRV/(°)	0	13.0	10.8	10.8
Grille MRH/(°)	0	-11.9	-9.4	-9.4
Grille RV/(°)	0	4.9	10.4	9.3
Grille RH/(°)	0	12.0	9.5	9.5

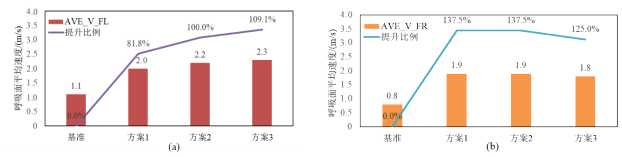


图 16 优化前后方案对比

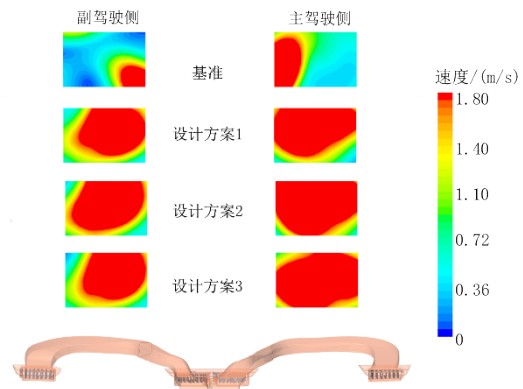


图 17 呼吸面速度分布云图

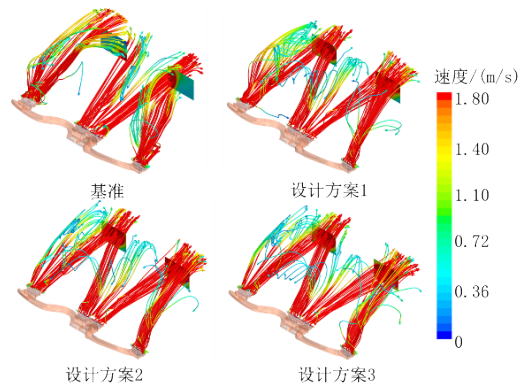


图 18 出风口迹线图

4 乘员舱降温性能改进

4.1 优化前后的温度场仿真对比

针对上文的达标方案 2 和基准方案速度场分别

进行温度场仿真。在速度场稳态模型基础上打开瞬态模型，设置时间步长为 1 s，总时长为 3 600 s。激活辐射模型和能量模型，设置各壁面热边界条件，空调箱入口增设降温曲线。对照环模试验，定义垂直向下的太阳光，强度为 1 000 W，初始化乘员舱温度为 60 °C，完成温度场仿真设置。

图 19~21 为达标方案 2 和基准方案呼吸面 X 向剖面、主驾驶侧 Y=-0.38 m、副驾驶侧 Y=0.38 m 剖面的温度分布云图，图中红色线条表示呼吸面的区域。由图可知，方案 2 呼吸面区域的温度明显低于基准方案，可见方案 2 吹脸风口出来的气流均集中吹向呼吸面，降温速率和效果提升明显。

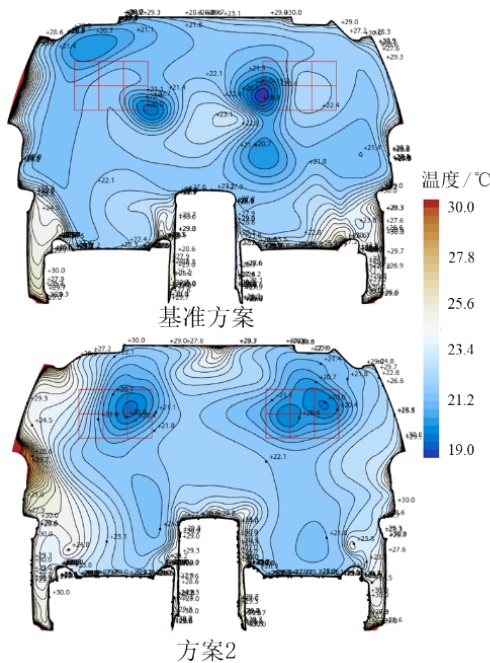


图 19 呼吸面 X 剖面温度云图

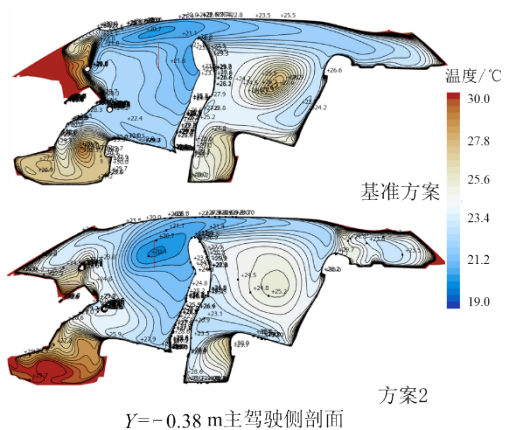


图 20 Y=-0.38 m 主驾驶侧剖面温度云图

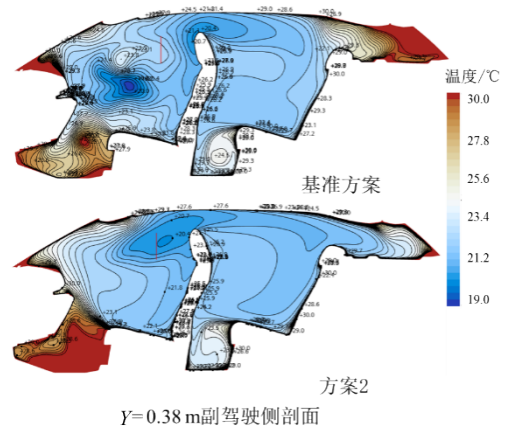


图 21 Y=0.38 m 副驾驶侧剖面温度云图

在主、副驾驶两侧的呼吸面上取 3 个温度监控点，这个主要参考汽车整车空调系统最大降温性能试验方法中的取点方式，FL1/FL2/FL3 表示主驾驶侧呼吸面监控点，FR1/FR2/FR3 表示副驾驶侧呼吸面监控点，如图 22 所示。

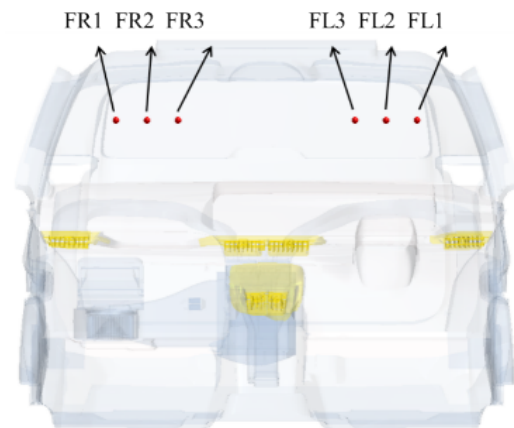


图 22 仿真模型呼吸面监控点

监控其温升变化，主驾驶侧呼吸面 3 个点和副驾驶侧呼吸面 3 个点的平均温升如图 23 所示，基准方案和方案 2 的点 FR1 和 FL3 结合图 17，其温升变化曲线比较接近，对其他点方案 2 明显优于基准方案。

4.2 对标试验

对方案 2 状态下的温度场分析结果进行对标试验，试验在中汽研（天津）汽车研究有限公司的环境风洞中进行。利用 3D 打印，确保调整角度的一致性。参考汽车整车空调系统最大降温性能试验方法，将环境仓温度设置为 43 °C、相对湿度设置为

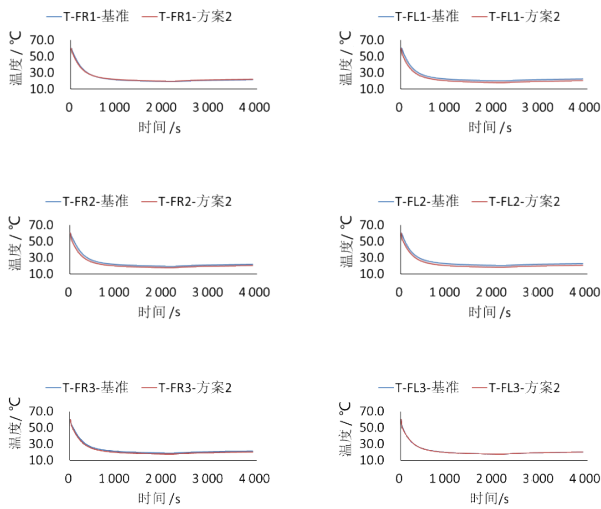


图23 监控点温升变化曲线

40%、阳光负荷调整为 1000 W/m^2 ，先用温度模式进行升温，再用气候模式调整湿度，根据空调试验要求进行晒车，车辆前端加设挡板，关闭车辆门窗，关闭试验仓门窗，当呼吸面的平均温度达到 $60 \text{ }^\circ\text{C}$ ，试验即可开始。按照最大降温性能试验方法^[15]，记录降温过程的温升变化。

本对标试验主要对比主、副驾驶侧呼吸面3个监控点的温升变化。图24为试验车在试验中主、副驾驶侧呼吸面监控点示意图，与仿真模型一一对应。



图24 试验车呼吸面监控点

4.3 试验结果分析

表5为呼吸面监控点试验与仿真对比结果，可以看出各呼吸面点的实测值和仿真值误差不大，最大差异为 $1.4 \text{ }^\circ\text{C}$ ，对标结果较好。

参考文献 (References)

[1] 杨志刚,徐鑫,赵兰萍,等.乘员舱驾驶员位置微环境及人体热舒适分析[J].同济大学学报(自然科学版),2020,48(5):733-742.

表5 呼吸面监控点温度对标结果

方案	FL1/ $^\circ\text{C}$	FL2/ $^\circ\text{C}$	FL3/ $^\circ\text{C}$	FR3/ $^\circ\text{C}$	FR2/ $^\circ\text{C}$	FR1/ $^\circ\text{C}$
试验值	22.2	21.9	21.5	21.4	20.8	21.9
CFD值	20.8	21.0	20.7	21.8	21.8	21.3
差值	1.4	0.9	0.8	-0.4	-1.0	0.6

5 结论与展望

本文搭建了基于某SUV车型吹脸风口格栅角度的多目标优化流程，得到了可指导工程设计的主驾驶侧呼吸面速度和副驾驶侧呼吸面速度的帕累托前沿解集，并基于最优解的格栅叶片位置进行了瞬态温度场CFD仿真和环境空调降温对标试验。具体结论如下。

1) 汽车空调双叶片型出风口格栅角度对乘员舱内流场组织有显著影响，同一侧的叶片对同侧的呼吸面速度呈非线性影响，对另一侧的呼吸面速度也呈非线性影响，但同侧的影响明显大于非同侧的影响。

2) 通过NSGA-III算法可以得到多目标优化问题的帕累托前沿解集，经过筛选，主、副驾驶侧呼吸面速度、副驾驶侧呼吸面速度两个目标同时达到最优，使某车型电动出风口在特定乘员位置的呼吸面平均速度均能满足大于 1.8 m/s 的评价目标。

3) 建立的神经网络代理模型经CFD仿真验证，预测误差在4%以内，表明神经网络代理模型可用于代替仿真计算，提高计算效率，缩短设计周期。

4) 通过乘员舱温度场CFD仿真及降温性能试验，对比吹脸流速性能优化方案，结果表明，吹脸流速性能优化方向与乘员舱的降温性能是一致的，在后续研究中可以采用吹脸流速性能进行乘员舱降温性能的研究，缩短仿真周期，节约仿真资源。

基于本文的研究，下一步可将神经网络代理模型多目标优化方法应用在汽车实际行驶过程中，实现乘员舱乘员的人体舒适自动调节。

YANG Zhigang, XU Xin, ZHAO Lanping, et al. Analysis on the Microenvironment and Human Thermal Comfort of the Driver Position in the Passenger Compartment[J].

- Journal of Tongji University (Natural Science), 2020, 48 (5):733-742.(in Chinese)
- [2] 王国华, 桑国辉, 张英朝, 等. 汽车乘员舱热舒适性影响因素多参数优化分析[J]. 汽车工程, 2023, 45 (11): 2023-2033, 2057.
WANG Guohua, SANG Guohui, ZHANG Yingchao, et al. Multi-Parameter Optimization Analysis of Factors Influencing Thermal Comfort in Automobile Passenger Compartment [J]. Automotive Engineering, 2023, 45 (11):2023-2033, 2057.(in Chinese)
- [3] SHAFIE N E A, KAMARH M, KAMSAH N. Effects of Air Supply Diffusers and Air Return Grilles Layout on Contaminants Concentration in Bus Passenger Compartment [J]. International Journal of Automotive Technology, 2016, 17(5):751-762.
- [4] CHEN Suifan, XUE Dong, LI Qipeng. et al. Thermal Comfort of Automobile Driver Based on Local Air Conditioning Vent Arrangement [J]. International Journal of Automotive Technology, 2023, 24(4):945-954.
- [5] PRATEEK B, PAUL N M, MAIYA M P, et al. Influence of Flow and Thermal Characteristics on Thermal Comfort Inside an Automobile Cabin Under the Effect of Solar Radiation [J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 203: 117946.1-117946.16.
- [6] KARN A, RAGHAV G, BHAT A. Enhancement of Efficiency and Thermal Comfort in a Passenger Car Cabin Using Spanwise Inlet Vents [J]. Engineering Journal, 2021, 25(2):95-108.
- [7] LEE D W, LEE H S. Impact of Focus- and Diffuse-Type Air Vents on Cabin Thermal Comfort [J]. International Journal of Automotive Technology, 2020, 21 (5) : 1315-1322.
- [8] 吕鸿斌, 陈博, 高天元, 等. 基于流场和温度场的轿车乘员舱热舒适性分析 [J]. 汽车工程, 2020, 42 (2) : 234-239.
LYU Hongbin, CHEN Bo, GAO Tianyuan, et al. Analysis on Thermal Comfort in Car Passenger Compartment Based on Flow Field and Temperature Field [J]. Automotive Engineering, 2020, 42(2):234-239.(in Chinese)
- [9] 唐江明, 谷正气, 莫志姣, 等. 汽车空调送风格栅优化与乘员热舒适性改进 [J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2016, 39(3):309-313, 394.
TANG Jiangming, GU Zhengqi, MO Zhijiao, et al. Optimization of Vehicle Air-Conditioning Grilles and the Improvement of Passenger Thermal Comfort [J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2016, 39(3):309-313, 394.(in Chinese)
- [10] 曹凡, 李迪, 李耀民, 等. 基于 Isight 平台的房车空调送风参数优化 [J]. 液压与气动, 2019(4):34-41.
CAO Fan, LI Di, LI Yaomin, et al. Optimization Based on Isight Platform for Air Inlet Parameters in RV Air Conditioner [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2019 (4):34-41.(in Chinese)
- [11] LI Nan, YANG Lin, LI Xiaodong, et al. Multi-Objective Optimization for Designing of High-Speed Train Cabin Ventilation System Using Particle Swarm Optimization and Multi-Fidelity Kriging [J]. Building and Environment, 2019, 155:161-174.
- [12] 张喜清, 孙世成, 王亚龙. 基于 RBF 神经网络代理模型的装载机空调送风参数优化 [J]. 中国工程机械学报, 2023, 21(1):16-21.
ZHANG Xiqing, SUN Shicheng, WANG Yalong. Optimization of Air Supply Parameters of Loader Air Conditioner Based on RBF Neural Network Agent Model [J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2023, 21 (1):16-21.(in Chinese)
- [13] MINASNY B, MCBRATNEY A B. A Conditioned Latin Hypercube Method for Sampling in the Presence of Ancillary Information [J]. Computers & Geosciences, 2006, 32(9):1378-1388.
- [14] DEB K, AGRAWAL S, PRATAP A, et al. A Fast Elitist Nondominated Sorting Genetic Algorithm for Multi-Objective Optimization: NSGA-II [C]// 6th Parallel Problem Solving from Nature, Sept. 18-20, 2000, Paris, France. Berlin: Springer, c2000: 849-858.
- [15] 中国汽车工程学会. 汽车整车空调系统最大降温性能试验方法: T/CSAE 145—2020 [S]. 北京: 中国汽车工程学会, 2020.
China SAE. Air Conditioning System Maximum Cooling Performance Test Procedure for Passenger Vehicle: T/CSAE 145—2020 [S]. Beijing: China SAE, 2020. (in Chinese)

作者简介



冯英 (1986-), 女, 江西萍乡人, 硕士, 工程师, 主要研究方向为汽车数值仿真。
E-mail: fengying271010@163.com

通信作者



余显忠 (1971-), 男, 四川营山人, 博士, 正高级工程师, 主要研究方向为汽车数值仿真。
E-mail: xyu6@jmc.com.cn