

电动汽车乘员舱空调送出风方式设计

赵兰萍^{1,2}, 吴国敏^{1,2}, 徐鑫^{1,2}, 杨志刚^{1,2}

(1. 同济大学机械与能源工程学院, 上海 201804; 2. 同济大学上海市地面交通工具空气动力与热环境模拟重点实验室, 上海 201804)

摘要: 基于流场结构与车内热环境相关性, 提出 5 种不同于传统方式的新型空调送出风方式。采用计算流体力学(CFD)仿真结合人体热调节模型, 分析不同送出风方式下车内热环境特点。利用等效均匀温度(EHT)热舒适性评价法对各送出风方式进行评估。结果表明, 平均辐射温度和平均风速对驾乘人员热感觉的影响大于车内平均温度; 顶送顶出方式和 2 种混合送出风方式具有最好和最差综合性能, 而传统送出风方式下乘员舱热舒适均匀性和能耗性能均较差。

关键词: 乘员舱热环境; 送出风方式; 等效均匀温度(EHT); 热舒适性; 冷负荷

中图分类号: TK11

文献标志码: A

Design of Air Supply-out Layout of Air Conditioning for Electric Vehicle Cabin

ZHAO Lanping^{1,2}, WU Guomin^{1,2}, XU Xin^{1,2}, YANG Zhigang^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Shanghai Key Laboratory of Vehicle Aerodynamics and Vehicle Thermal Management Systems, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Based on the correlation between flow structure and thermal environment inside vehicle cabins, five new air supply-out layouts different from traditional layouts were proposed. CFD simulation combined human thermal regulation model was used to analyze the characteristics of the cabin thermal environment under each layout. Then, the equivalent homogeneous temperature (EHT) based thermal comfort model was used to evaluate each layout. It is shown that the mean radiant temperature and mean air velocity have greater impact on the cabin thermal comfort than the average air temperature of the cabin. The top supply-out layout and the two composite layouts demonstrate the best and worst overall performance respectively, while the traditional air supply-out layout displays a high energy consumption with

poor comfort uniformity.

Keywords: thermal environment of vehicle cabin; air supply-out layout; equivalent homogeneous temperature (EHT); thermal comfort; cooling load

车内热环境不仅与行车安全及驾乘人员驾乘体验有关^[1-2], 还与空调能耗密切相关。电动汽车的能源供应全部来自于电池, 其中夏季空调能耗占比高达 30%^[3], 保证人体热舒适的同时降低空调能耗在电动汽车设计中显得尤为重要^[4]。根据经典热舒适理论, 影响人体热舒适的环境因素包括空气温度、速度、相对湿度以及平均辐射温度。受太阳辐射及结构布置等因素影响, 汽车乘员舱热环境还呈现不均匀和不对称特征, 进一步加剧了车内热舒适的复杂性。现有汽车乘员舱设计大多基于经验布置出风口位置, 之后根据重要位置的温度和风速实测结果调整送风参数。此类设计方法无法顾及车内热舒适的复杂成因, 因而无法保证驾乘人员热舒适, 且有可能造成不小的能源浪费。

在外界环境参数一定的情况下, 车内热舒适主要由空调送出风方式决定的流场结构所主导。计算流体力学(CFD)仿真技术结合人体热舒适性评价模型, 使得以热舒适为考核指标的乘员舱热环境设计成为可能并获得应用, 以优化风口位置及送风参数等。庄国华等^[5]运用 CFD 仿真, 基于等效均匀温度(EHT)评价标准给出合理的风量/风温组合策略。程思淇^[6]将一维仿真与三维仿真相结合, 提出以满足热舒适为前提的最低能耗送风参数。Liu 等^[7]确定了不同送风参数下汽车空调的舒适-节能区。王国华等^[8]研究了送风速度与送风温度对热舒适的影响。Lu 等^[9]在满足热舒适的前提下得到了能耗最小的送风速度拟合曲线。以上研究大多基于仪表板送

收稿日期: 2024-09-21

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFE0208000); 中央高校基本科研业务费专项资金(2022YFE0208000)

第一作者: 赵兰萍, 副教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为整车热管理及高效换热技术。

E-mail: lanpingzhao@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

风后排条缝出风的传统送出风布置型式,与乘员舱内的流场结构类似,仅靠改变送风参数对车内热环境的优化空间不大。为进一步优化车内热环境,有学者在传统送出风方式的基础上加入局部空调来寻求舒适性和节能性的平衡。Wan等^[10]提出了在驾驶员周围采用5个小型热电冷却装置来构建局部空调,避免车内只有驾驶员时空调全开造成的能源浪费。Chen等^[11]提出了驾驶员顶部天花板独立进风口布置和上下混合进风口布置,解决车内只有一个乘客时的能耗问题。

目前,量产车的汽车空调送风方式大致可分为传统直吹式送风、分层送风、个性化通风和隐藏式多向送风4类。前2种多见于燃油车,其设计常受限于传统的仪表台布局与动力总成位置,而后2种则主要见于新兴的纯电动汽车平台。传统送风方式为仪表台出风口直吹加脚部送风,气流直接冲击驾乘人员上半身,后排条缝出风,这种型式结构简单且成本低,因此被广泛采用,如荣威350和丰田卡罗拉等车型均采用此类送风方式。分层送风采用上层挡风玻璃侧微孔矩阵送风,下层座椅扶手侧旋流送风,车顶隐藏条形回风口,此类方式温度分层误差小,目前多运用于高端车型如奔驰EQS和宝马7系等。考虑到电动汽车规模化生产时间不长,且机械结构(如无传统传动轴、发动机)为整车各子系统的全新设计提供了可能,因此更加个性化和精细化的车内流场设计出现。蔚来ET7和理想L9等车型采用个性化通风方式,每个座位由4~6个微型出风口独立控制,但系统的高复杂度导致故障率较高。对于隐藏式多向送风无实体出风方式,如:特斯拉Cybertruck采用仪表台全域微穿孔送风,蔚来ET9采用车顶纳米纤维送风膜,丰田bZ3X仪表台/门板采用多孔聚氨酯材料送风,送风温度均匀性提升,但在高速工况下的风噪控制与成本问题仍是产业化障碍。

现有公开发表的文献大多针对传统送风方式展开研究,鉴于流场结构与车内热环境的强相关性,应从基本流场结构层次对新型送风方式下车内热舒适变化规律方面进行探究。本文参考建筑及轨道车辆等应用场合的空调送风方式,从流场设计角度着手,结合人体热调节模型,以驾乘人员的热舒适为主要目标,寻求热舒适性与空调能耗综合性能最优的气流组织方案,为通过优化送风方式、提升设定温度等策略实现空调系统节能提供关键依据。

1 送出风方式设计

以应用最广泛的直吹式送风为基准参照系,参考建筑等应用场合的空调送风方式,提出5种新型送出风方式。图1给出了6种送出风布置方式示意,包括前送后出的传统方式、顶送顶出方式、顶送侧出方式、底送顶出方式以及底送风分别与顶送顶出及顶送侧出相结合的2种混送方式。其中,顶送顶出方式参考了轨道车辆的类似结构,顶送侧出方式将出风口位置从顶部改为车身两侧的车门上,底送顶出方式则参考了建筑领域的置换通风型式。顶部送风口位于乘员舱顶正上方,类似孔板送风,其特点是总送风面积较传统送风方式大;顶部出风口位于舱顶靠近前窗玻璃的部分,呈条缝状;侧面出风口则位于侧窗以下的车门上,4个车门分别有4个大小相近的出风口,且左右两边对称;底部送风口位于各座椅下方。

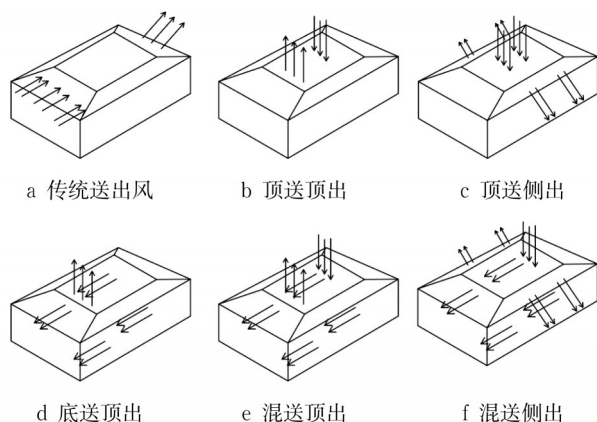


图1 6种送出风方式示意

Fig.1 Schematic diagram of air supply-out layouts

表1给出了6种送出风布置方式的进、出风口总面积,其中顶部送风设置36个直径为5 cm的送风孔。顶送侧出及2种混送方式的顶送结构也均采用36孔,为方便起见,混送顶出和混送侧出结构的送风口面积简单设定为顶送面积和底送面积之和。

表1 送风口和出风口总面积

Tab.1 Total area of airflow inlets and outlets

布置方式	送风口总面积/cm ²	出风口总面积/cm ²
传统前送后出	268.71	110.72
顶送顶出	2 766.43	216.43
顶送侧出	2 766.43	168.03
底送顶出	998.25	216.43
混送顶出	3 764.68	216.43
混送侧出	3 764.68	168.03

2 仿真方法及验证

2.1 几何模型与网格划分

本文的研究车型为荣威350。首先利用三维扫描技术获得实验用车乘员舱内各部分的几何数据,然后在CATIA软件中进行逆向建模与简化处理,最后加入4个人体几何模型。图2为乘员舱内部示意。将在Hypermesh中处理后的各送出风布置方式对应的乘员舱面网格导入STAR-CCM+中生成体网格,体网格类型选用多面体网格加边界层网格,最终体网格总数控制在356万左右。副驾、主驾后位和副驾后位的乘客编号分别为1、2、3。

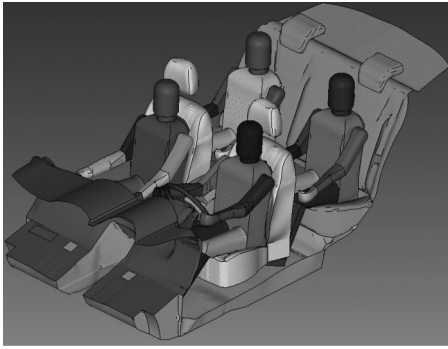


图2 乘员舱内部示意

Fig.2 Schematic diagram of vehicle cabin inside

2.2 车内热环境仿真模型

太阳短波辐射通过玻璃进入车内,小部分被玻

$$T_{MRT} = \left[\frac{\sigma \sum_{i=1}^M F_{o,i} T_i^4 + \alpha_o \sum_{i=1}^M (\tau_i f_{i,o} \cos \theta_i G_D + \tau_i F_{o,i} G_d + F_{o,i} \rho_i Q_{rad,solar,i})}{\sigma \epsilon_o} \right]^{1/4} \quad (1)$$

式中: σ 为Stefan-Boltzmann常数; M 为离散表面总数; $F_{o,i}$ 为驾乘人员与各离散面间的角系数; T_i 为各离散面温度; $f_{i,o}$ 为各离散单元在驾乘人员表面的面积投射因子; G_D 和 G_d 分别为直射辐射强度和散射辐射强度; α 、 τ 、 ρ 分别为吸收率、透射率和反射率; θ 为太阳直射入射角; $Q_{rad,solar,i}$ 为第 i 个离散单元接收的太阳辐射能量; ϵ_o 为人体表面发射率。

2.3.2 热舒适评价方法

采用适合不均匀热环境的EHT评价法。EHT计算式为^[18-19]

$$T_{eq} = T_s - \frac{Q}{h_{cal}} \quad (2)$$

式中: T_{eq} 为EHT; T_s 为皮肤温度; Q 为干热损失,是对流换热量及辐射换热量之和; h_{cal} 为理想均匀基准

璃吸收,大部分进入车内后在包括人体表面在内的各个壁面间被不断吸收和反射,被反射的短波辐射可以透过玻璃离开乘员舱,而被壁面吸收后投射出的长波辐射则无法透过玻璃离开乘员舱。同时,温度升高的固体内壁面通过对流形式与舱内气流进行热传递,人体与周围气流对流换热并与座椅进行热传导、与舱内各壁面进行长波辐射换热,也有部分太阳辐射透过玻璃直接照射在人体表面,驾乘人员在其中通过热生理调节最终达到热平衡。

车内流场计算选用realizable k - ϵ two-layer (RKE 2L)^[12-13]湍流模型,realizable k - ϵ 模型能较准确地预测平面和圆形射流的扩散作用。为考虑黏性影响层的流动状态,Rodi^[14]提出了2层方法,该方法可将 k - ϵ 模型应用于黏性底层与缓冲层。人体与舱内各壁面的辐射换热选用surface to surface (S2S)模型,其中辐射波段选择多波段热辐射。该模型忽略了舱内空气的吸收、发射和散射,仅考虑面与面之间的辐射传热。人体热调节计算采用Stolwijk^[15]提出的人体生理热调节模型,本文仿真中将人体分为14个节段,每个节段又分为皮肤、脂肪、肌肉与核心4层^[16]。Stolwijk模型能较好地模拟非均匀热环境下的人体热生理反应^[17]。

2.3 数据处理方法

2.3.1 平均辐射温度

夏季车内热环境在空调作用下呈低气温和高平均辐射温度(MRT)特点。平均辐射温度计算式为

环境下的人体表面传热系数,本文中称为基准综合换热系数, h_{cal} 的取值来自文献[20]。

基于EHT的热舒适区是人体热舒适评价在EHT值域上的映射,采用Nilsson所提出的EHT舒适区^[21],并根据夏季人体典型衣物热阻 $0.08 (m^2 \cdot K) \cdot W^{-1}$,得到如图3所示的人体14个节段与整体的EHT舒适范围。

2.3.3 乘员舱热舒适的相对不均匀指标

车内4个位置的热环境不同,导致驾乘人员的EHT不同。送出风方式一定时,定义某太阳辐射照度下驾乘人员EHT标准差为

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{o=1}^N (T_{eq,w,o} - \overline{T_{eq,w}})^2}{N}} \quad (3)$$

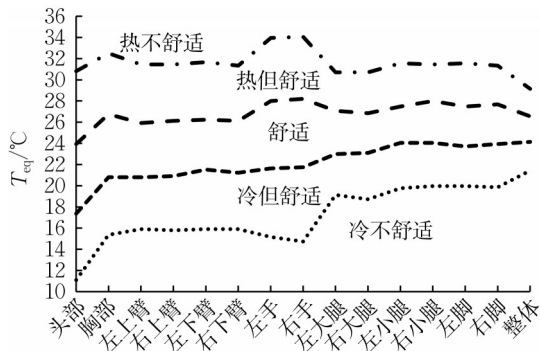


图3 EHT热舒适区划分

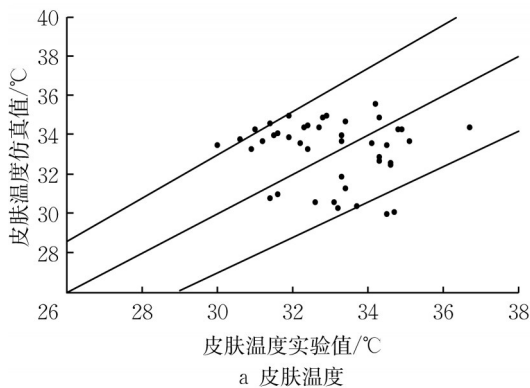
Fig.3 EHT based thermal comfort zone division

式中: $\overline{T_{eq,w}}$ 为整体EHT均值; N 为乘员舱中人数。

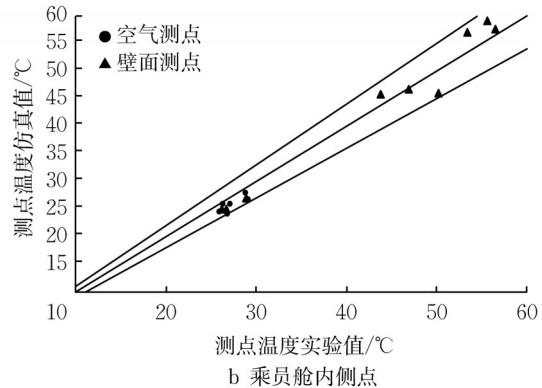
不同太阳辐射照度下, 驾乘人员EHT的标准差并不相同。此处定义夏季太阳辐射照度 600、700、800、900、1 000 $W \cdot m^{-2}$ 范围内乘员舱热舒适的相对不均匀指标为

$$\mu = \frac{\sum_{j=1}^5 S_j}{5 S_{j, \text{传统}}} \quad (4)$$

式中: j 为5种太阳辐射照度编号; S_j 为某一种送出风



a 皮肤温度



b 乘员舱内侧点

图4 皮肤、乘员舱温度仿真值与实验值对比

Fig.4 Comparison of skin and cabin temperature between simulation and experimental results

3 结果分析

人与热环境之间的热交换是人体热生理反应及热舒适状态的主要起因。下文将对各种送出风方式下乘员舱的热环境参数、驾乘人员热生理反应和热舒适状态等进行对比。各送出风方式的送风量统一设为 $0.19 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$, 送风温度为 15°C 。太阳辐射相关参数设定如下: 方位角 210° , 高度角 70° , 太阳辐射照度 $1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (上海地区, 夏季)。

方式下驾乘人员EHT的标准差; $S_{j, \text{传统}}$ 为传统送出风方式下驾乘人员EHT的标准差。

2.3.4 空调冷负荷

空调冷负荷计算式为

$$Q_c = c_p q_m \Delta T \quad (5)$$

式中: c_p 为送出风平均温度下空气定压比热; q_m 为送风口质量流量; ΔT 为出风口和送风口的温差。

2.4 边界条件

计算中, 汽车处于车头朝向为南的停车状态, 室外温度为 33.8°C , 无风。送风口为质量流量入口, 送风温度均为 15°C , 相对湿度则为 40% , 出风口为压力出口。将具有各自导热热阻的车身和车窗外表面设定为对流换热边界条件。停车工况下, 各壁面及玻璃的相关物性及外表面对流换热系数设置参见文献[19]。计算中采用的夏季人体衣物热阻为 $0.08 (\text{m}^2 \cdot \text{K}) \cdot \text{W}^{-1}$ 。

2.5 仿真方法验证

图4对比了人体皮肤温度、舱内关键位置的空气温度及壁面温度的实验测量值与CFD模拟值。可以看出, 皮肤温度、壁面温度及空气测点温度的预测偏差大多在 10% 以内。

3.1 热流场

图5所示为6种送出风方式下舱内流场和温度场对比。传统送出风方式下送风面积较小(送风口速度接近 $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), 导致驾乘人员头部区域风速较高, 并在后排乘客前方形成大尺度涡流, 舱内温度呈前高后低、上低下高的非均匀特征。顶送顶出方式通过均匀顶部送风, 使前排处于回风区, 流场和温度场较为均匀, 舱下部因冷空气下沉而温度略低。顶送侧出方式下, 前排风速较低, 导致该区域温度偏高且垂直温差显著。底送顶出方式下, 后排风速较小, 温度明显高于前排, 但由于是顶

部出风,送风气流未能充分覆盖前排脚部区域。顶部和底部同时送风结合顶部出风时,速度场与温度场均匀性较好,仅前排温度略低。顶部和底部同时送风结合侧面出风时,舱内垂直温差增大。综上,顶送顶出方式的温度均匀性最佳,顶部底部同时送风顶部出风结构次之,传统布置前后温差显著,底送顶出方式的水平与垂直温

差均较大,顶部底部同时送风侧面出风结构的垂直温差最为突出。6种方式的舱内平均温度依次为24.7℃(传统)、22.4℃(顶送顶出)、23.3℃(顶送侧出)、22.3℃(底送顶出)、22.4℃(混送顶出)和23.7℃(混送侧出)。传统送出风与底送顶出方式下舱内平均温度相差2.4℃,凸显送风布局对热环境的影响。

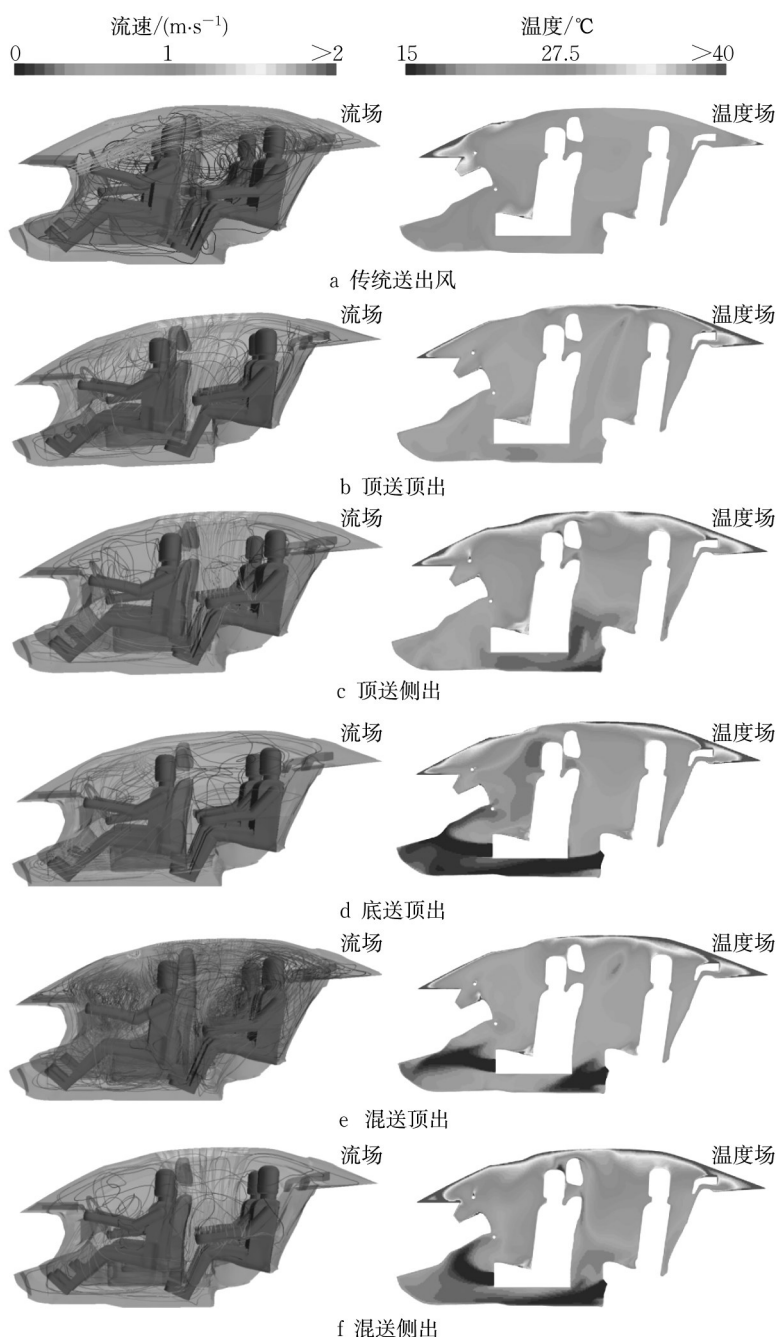


图5 6种送出风方式下流场与温度场对比

Fig.5 Comparison of velocity field and temperature field between six air supply-out layouts

3.2 平均辐射温度

图6所示为6种送出风方式下各壁面平均温度对比。可以看出,混送侧出方式下壁面温度整体最

高。该方式下,气流未集中冲刷特定壁面,太阳辐射及舱内设备散热在壁面累积,使得整体壁面温度升高。传统送出风方式下,高速冷风直接冲刷车顶与

车窗,显著增强了强制对流换热,从而大幅降低壁面温度,其对应温度明显低于其他送出风方式,前挡风玻璃温度比混送侧出方式低近10℃。顶送顶出与混送顶出送出风方式均采用顶部送风,气流在舱内形成较均匀的温度边界层,使得壁面温度分布相近。顶送侧出方式下,因气流路径短,部分冷风未充分参与换热就排出,导致所对应的壁面温度相对较高。底送顶出方式下,地板、车门及仪表台因处于冷空气流经区域而使得温度明显较低。上述壁面温度的差异源于不同送出风方式下形成的流场结构,送出风方式对壁面热环境具有决定性作用。

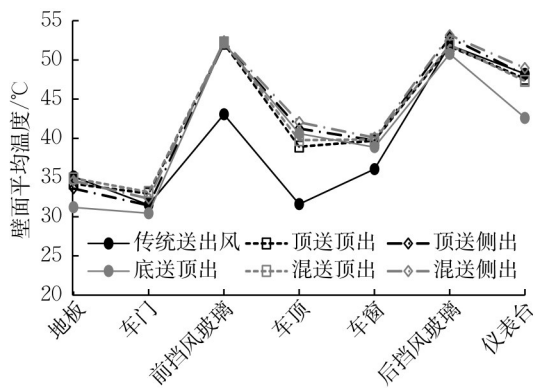


图6 6种送出风方式下各壁面平均温度对比
Fig.6 Comparison of average wall temperature between six air supply-out layouts

乘员舱壁面热环境对人体的热作用可通过平均辐射温度进行量化表征。平均辐射温度不仅体现了各壁面温度的高低,也与由进入车内的太阳直射辐射、散射辐射、人体在乘员舱中的相对位置及面积所决定的角系数有关。图7所示为6种送出风方式下驾乘人员平均辐射温度对比。前挡风玻璃的透射率较高,导致前排人员接收大量太阳直射辐射和散射辐射,且前排人员与高温前围区域的角系数较大,进一步提高了平均辐射温度。后排人员受长波辐射影响为主,辐射强度显著降低,前排人员平均辐射温度较后排高2.0~9.7℃。同时,由于太阳辐射方位导致的非对称辐射场,因此同排人员中右侧平均辐射温度高于左侧1.6~3.1℃;传统送出风、顶送侧出及混送侧出方式下前后排平均辐射温度差异显著(>5℃),底送顶出方式下底部送风呈现置换通风特征,冷空气上升过程均衡各壁面温度,故平均辐射温度分布最为均匀,顶送顶出和混送顶出次之。从平均辐射温度的4人平均值看,传统送出风方式下,平均辐射温度最低;2种混送方式下气流组织分散导致对流冷却效果减弱,因此平均辐射温度最高;其余3种

方式所对应的平均辐射温度相差较小。

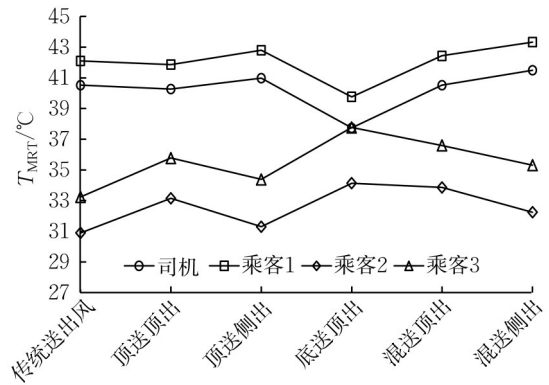


图7 6种送出风方式下驾乘人员平均辐射温度对比
Fig.7 Comparison of MRT of driver/passengers between six air supply-out layouts

由于车内热环境的不均匀性和不对称性,因此人体不同部位的平均辐射温度分布也呈现非均匀特征。图8所示为传统送出风与顶送顶出2种方式下驾乘人员表面平均辐射温度分布对比。可以看出,前排乘客受太阳直接辐射影响更大,导致其体表平均辐射温度整体高于后排乘客。2种送出风方式下,驾驶员与乘客1的小臂及大腿部位、乘客3的右臂上下部均呈现较高的平均辐射温度,这些区域通常直接暴露于太阳辐射。2种送出风方式下,高温区域的分布趋势相似,表明太阳辐射是影响平均辐射温度的主要因素。顶送顶出方式下后排乘客的平均辐射温度稍高于传统送出风方式,这主要是由气流组织不同引起的。

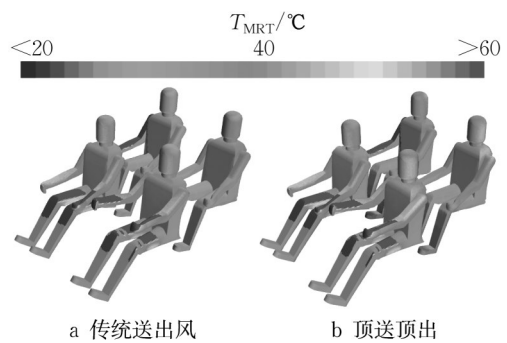


图8 2种送出风方式下驾乘人员表面平均辐射温度分布对比
Fig.8 Comparison of surface MRT distribution of driver/passengers between two air supply-out layouts

3.3 不同送出风方式下的驾乘人员热舒适性对比

在车内不均匀热流场及不对称辐射作用下,人体通过核心温度、血液流量及出汗等热生理参数的调节,最终与舱内热环境达到平衡。人体各节段的热响

应如皮肤温度可反映乘员舱热环境对人体的作用。

3.3.1 皮肤温度及体表热流

图9所示为6种送出风方式下驾乘人员各节段皮肤温度对比。受太阳辐射影响,前排人员皮肤温度普遍高于后排;受太阳高度角的影响,乘客1的皮肤温度整体高于司机,乘客3的皮肤温度整体高于乘客2。人体皮肤温度是不均匀的,高温区域集中于太阳直射部位,如前排人员的下臂和大腿部位、乘客3的右上下臂,但乘客2由于头部周围较高的空气温度和较低风速导致最高温度在头部;最低温度主要出现在送风气流直接作用区域或冷空气下沉处,如传统方式下司机的左手、底送顶出及2种混送方式下司机的脚部处于送风气流中,而顶送顶出和顶送侧出方式下脚部处于下沉冷空气中。传统送出风方式下皮肤温度极差最小,顶送顶出与混送顶出次之,顶送侧出、底送顶出及混送侧出方式极差最大。温度均匀性与送风气流分布特性密切相关,传统送出风方式下高速气流强化对流换热,而底送顶出方式下易导致局部过热或过冷。

图10给出了传统、顶送顶出、底送顶出和混送侧出4种送出风方式下驾乘人员表面热流密度分布。夏季送风温度低于皮肤温度,图10中热流密度为负值的区域表现为净放热,这些部位向舱内环境散发的对流换热量大于所有壁面及太阳辐射对这些部位的辐射换热量。具体表现为:传统送出风方式下驾驶员手部和乘客头部、顶送顶出方式下手臂、底送顶出方式下腿部等部位均呈现放热特征。由于车厢内存在复杂的辐射-对流耦合传热,因此各送风方式下人体不同部位因局部气流速度、角系数差异而呈现吸热与放热共存的状态。混送顶出方式下,通过优化气流组织降低体表热流密度的空间波动性,顶送顶出方式次之,这与2种方式下形成的速度场和温度场较为均匀相关,验证了流场结构与传热特性的关联性。

3.3.2 基于EHT的热舒适性

图11给出了太阳辐射照度 $1\ 000\ \text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 时6种送出风方式下驾乘人员的局部EHT。可以看出,底送顶出方式下,前排人员局部EHT值明显偏低,但乘客3除脚部外其余各节段EHT均为6种方式最高。因为送风口设置在座位底部,所以4人的小腿和脚部EHT值均维持较低水平。传统送出风方式下送风口较小,送风速度高,冷风气流沿程遮挡物少,高速气流直接穿透至后排,导致后排乘客头部和躯干2个节段EHT值远小于其余送出风方式,而躯

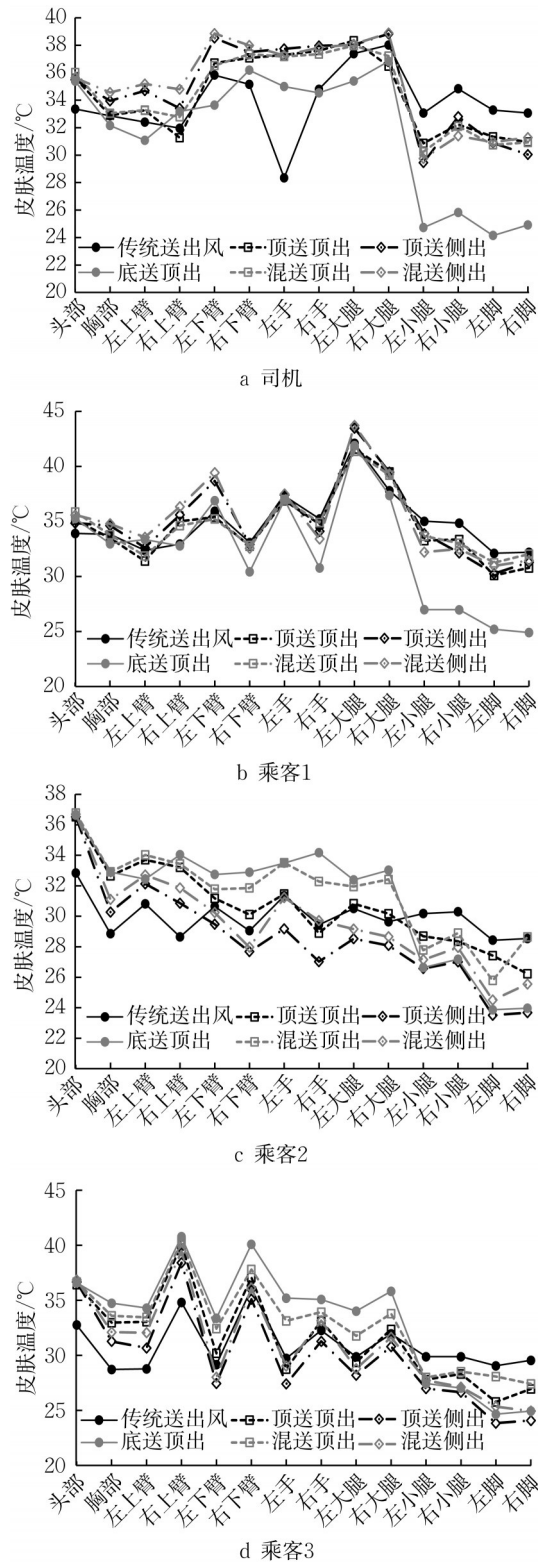


图9 6种送出风方式下驾乘人员各节段皮肤温度分布对比
Fig.9 Comparison of skin temperature distribution of driver/passengers' body segments between six air supply-out layouts

干节段是人体表面积占比最大的部分,因此后排乘客整体EHT偏低符合实际情况。同时,传统送出风

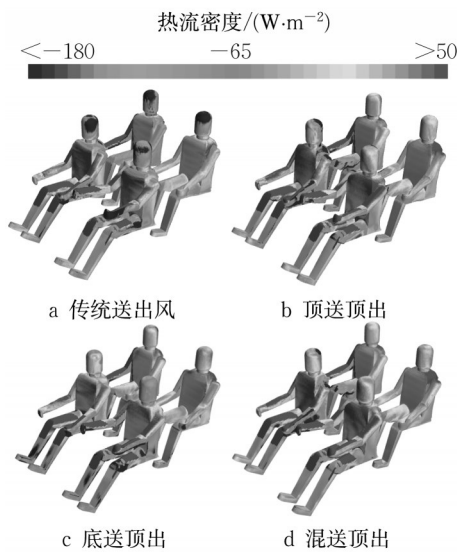


图10 驾乘人员表面热流密度分布

Fig.10 Heat flux distribution on the surface of driver/passengers

方式下,驾乘人员头部的EHT值均低于其余几种方式,仔细查对EHT计算过程中的数据,发现驾乘人员头部的温度并没有明显低于其他节段,但头部节段的干热损失非常大,推测头部的吹风感较强。对比分析可得,局部EHT差异与送风口位置呈强相关性:底部送风强化下肢冷却,而顶部/侧向送风更影

响上躯干部位的热感觉。

图12所示为太阳辐射照度 $1\ 000\ \text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 时6种送出风方式下驾乘人员基于EHT的整体热感觉。前排人员大多处于太热的状态。乘客1的热感觉强于驾驶员,乘客3的热感觉强于乘客2。除底送顶出外,前排人员热感觉均强于后排人员,此差异主要由太阳方位角及前挡风玻璃透射辐射所致;底送顶出方式下,因前排气流风速较大,驾驶员位置成为最凉爽的区域,乘客3受限于后排低速区则承受最热感觉。综合4人的热感觉,由于工况太阳辐射照度高,因此人员大多处于热或太热的状态,但不同送出风方式下车内人员热感觉的区别是明显的。底送顶出方式下总体均匀性最佳,处于热但舒适至太热区域;顶送侧出方式下,呈现“前排过热-后排舒适”的分布;传统送出风方式下,后排处于冷却舒适的状态,驾驶员因所处位置风速较高而处于热但舒适的状态,乘客1则受太阳直射影响严重过热;顶送顶出以及2个混送方式下,驾乘人员大多处于热和太热的状态;相对而言,3种顶出风方式即顶送顶出、底送顶出和混送顶出方式下前后排人员热感觉的差距较小,体现较好的空间均匀性,而2种侧出风方式下,前后排人员热感觉差距较大,传统送出风方式则介于两者之间。综合来看,顶送顶出方式呈现最好的车内热舒适特征,4人的整体EHT值差异最小且相

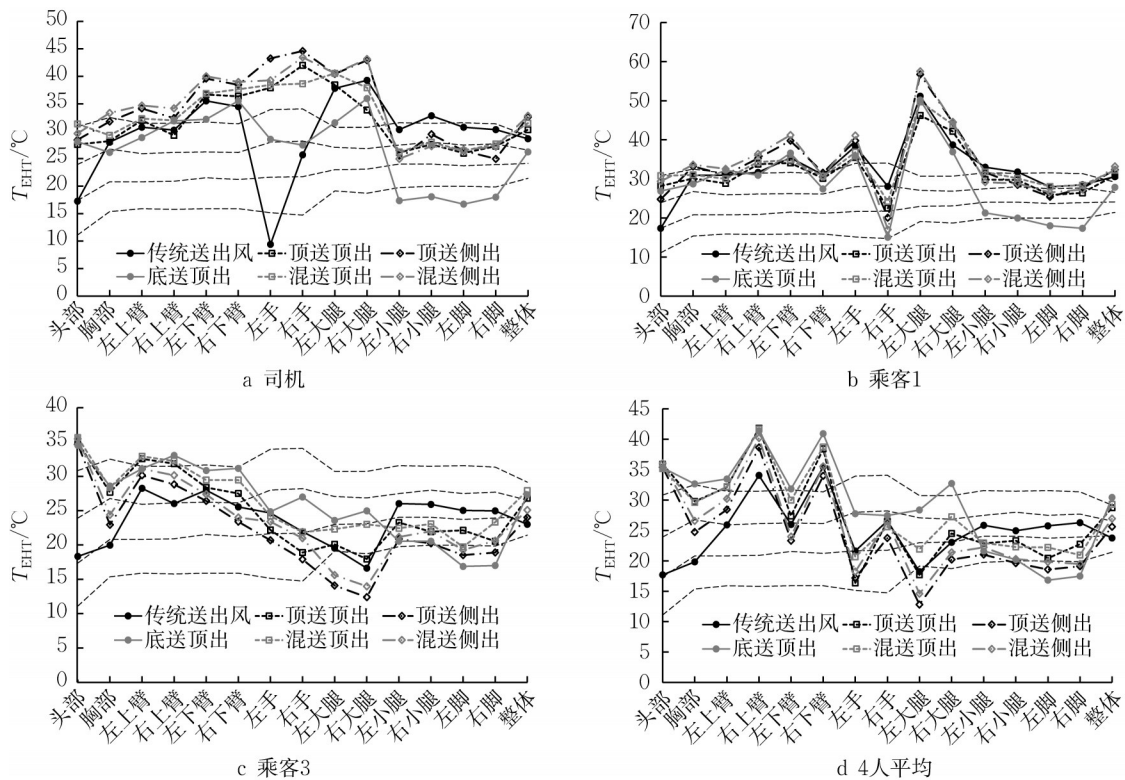


图11 6种送出风方式下驾乘人员的局部EHT对比

Fig.11 Comparison of local EHT of driver/passengers between six air supply-out layouts

对不高,虽在强太阳辐射条件下驾乘人员整体热感觉仍偏高,但显著优于其余送出风方式。

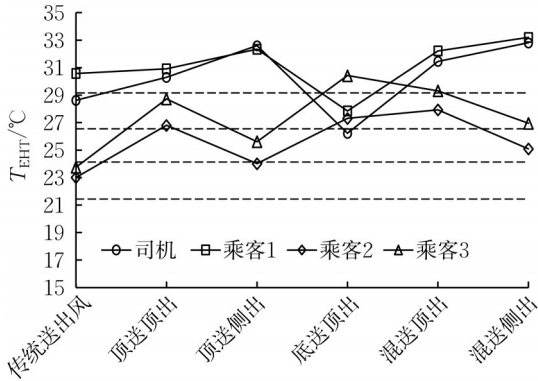


图 12 6种送出风方式下驾乘人员基于EHT的整体热感觉对比

Fig.12 Comparison of overall thermal sensation of driver/passengers based on EHT between six air supply-out layouts

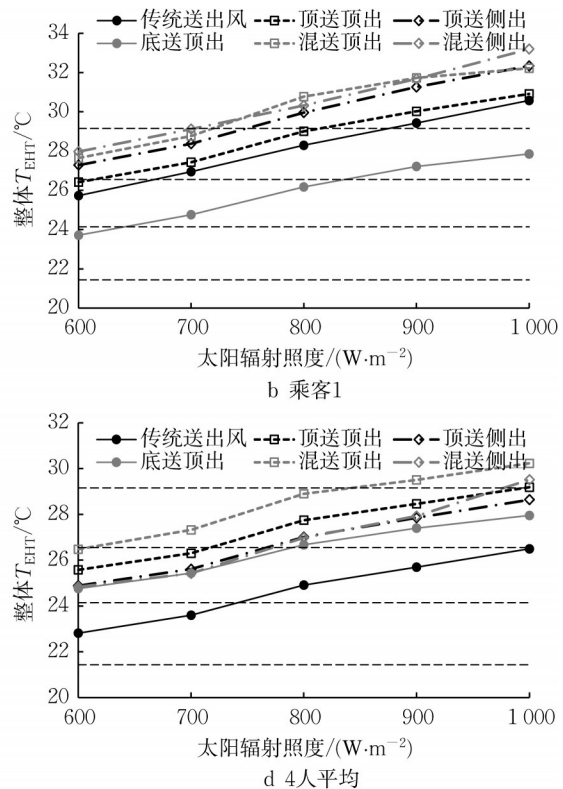
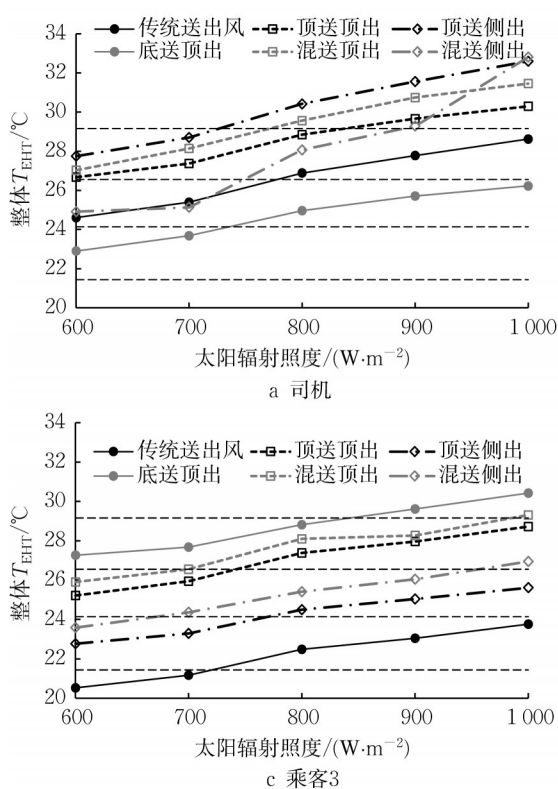


图 13 不同太阳辐射照度时6种送出风方式下驾乘人员整体EHT对比

Fig.13 Comparison of overall EHT of driver/passengers under different solar radiation intensities between six air supply-out layouts

评价乘员舱热环境优劣,除了驾乘人员所处的舒适区域,4人热舒适状态的均匀性也是重要的评价指标之一。4人整体热感觉在某个工况下越接近,则该乘员舱流场设计的热舒适均匀性越好。本文定义

3.3.3 太阳辐射照度对4人整体热感觉的影响

考虑到夏季太阳辐射照度是车内热环境最重要的影响因素,图13给出了不同太阳辐射照度时6种送出风方式下驾乘人员整体EHT。结果表明,不同送出风方式对前后排影响高低的排序并不相同。对于前排2人而言,底送顶出和传统方式所对应的整体EHT值最低,顶送侧出和混送侧出最高,高太阳辐射照度下,EHT值最高的方式是混送侧出。后排2人整体EHT值最低的送出风方式为传统方式和顶送侧出方式,最高的2种是混送顶出和底送顶出。由此可见,面对太阳辐射照度的变化,传统方式和顶送顶出方式综合性能较好。传统方式在同时满足4人热舒适方面具有优势,不过当太阳辐射照度较低时,后排偏冷,太阳辐射照度较高时,前排2人过热。顶送顶出方式在 $800\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 以下时,4人均处于舒适到热但舒适区域, $800\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 以上时,前排2人处于过热的状态,后排2人仍处于舒适到热但舒适区域。

热舒适的不均匀性为:各送出风方式下,驾乘人员在不同太阳辐射照度时的平均EHT标准差与传统方式下对应的平均EHT标准差的比值。从高到低,6种送出风方式的热舒适性-不均匀性指标排序为:顶

送侧出1.16,传统送出风方式0.99,混送侧出0.90,底送顶出0.52,混送顶出0.49,顶送顶出0.46。顶送顶出方式的热舒适均匀性最好,而顶送侧出的热舒适均匀性最差。

3.4 不同送出风方式下的空调冷负荷对比

对比不同送风方式下的空调冷负荷特性,发现传统送出风方式下的冷负荷最高,为1630 W,底送顶出方式次之,为1495 W,混送侧出方式的冷负荷

最低,为1313 W,顶送顶出、顶送侧出和混送顶出方式对应的冷负荷在1358~1396 W之间,相差不大。6种方式中,最高冷负荷为最低冷负荷的1.24倍。送风方式对冷负荷的影响主要体现在流场结构不同导致的壁面换热效率差异。

3.5 不同送出风方式下的性能汇总

将乘员舱热环境影响因素和评价指标进行汇总,如表2所示。

表2 6种送出风方式下乘员舱热环境参数及性能评价汇总

Tab.2 Summary of the thermal environment parameters and performance evaluation of the cabin under six air supply-out layouts

参数	传统送出风	顶送顶出	顶送侧出	底送顶出	混送顶出	混送侧出	
影响因素	平均温度	1	4	3	5	2	
	平均速度	1	4	3	2	5	
	MRT	3	2	2	2	1	
	热环境特征	温度最高 速度最大 MRT最低	温度低 速度较低 MRT居中	温度较高 速度较高 MRT居中	温度最低 速度较大 MRT居中	温度低 速度最低 MRT高	温度高 速度低 MRT高
		平均热舒适	偏冷-舒适	舒适-偏热	舒适-偏热	舒适-偏热	偏热-太热
评价指标	热舒适不均匀性	2	5	1	4	3	
	冷负荷	1	3	3	2	4	

每个因素和评价指标按照从高到低进行排序,数字越小表示影响参数或性能指标的数值越大。可以看出,舱内平均速度和平均辐射温度对热舒适性的影响大于舱内平均温度。对于传统送出风方式,最高速度和最低平均辐射温度使得平均热舒适状态较为理想,但热舒适均匀性较差,且能耗最高。2种混送方式下低风速和高平均辐射温度使得驾乘人员热舒适较差,其中混送顶出具有较好的热舒适均匀性和较低的冷负荷。顶送顶出、顶送侧出和底送顶出则处于中间。综合6种送出风方式的性能,顶送顶出的热舒适均匀性最好,能耗较低。

4 结论

(1)送出风方式不仅影响车内热流场的均匀性及车内平均温度,还会对驾乘人员所对应的平均辐射温度产生影响,同时不同的送出风方式产生不同的空调冷负荷。

(2)平均辐射温度和平均风速在很大程度上决定了驾乘人员的热感觉,而舱内空气平均温度的影响较小,证明传统的基于温度目标的设计方法存在很大的局限性。

(3)以驾乘人员热舒适和热舒适均匀性为考核指标,6种送出风方式从优到劣顺序为:顶送顶出、底送顶出、传统送出风、顶送侧出、混合侧出、混送

顶出。

(4)综合热舒适及空调冷负荷,顶送顶出方式具有最好的综合性能。考虑到实际车辆中热舒适指标的重要性高于空调冷负荷,顶送侧出方式下前后排人员舒适性相差特别大,2种混送方式在夏季太阳辐射范围内处于偏热和太热的区域,不推荐这3种方式。传统送出风方式下热舒适的均匀性和能耗性能均较差,但平均热舒适较好。

作者贡献声明:

赵兰萍:理论指导,论文内容规划及修改。

吴国敏:数值计算,数据分析,论文撰写。

徐鑫:实验验证。

杨志刚:实验及计算资源提供。

参考文献:

- [1] WENG M, LIU A, ZHANG Y, *et al.* Research on the evaluation of occupants' work efficiency in summer thermal environment of special vehicles based on subjective thermal sensation[J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2024, 61: 104886.
- [2] XU X, ZHAO L, HU Y, *et al.* Effects of driving behavior on human thermal perception and electroencephalogram in vehicles [J]. *Transportation Research, Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2025, 111: 60.
- [3] LAJUNEN A. Energy efficiency and performance of cabin thermal management in electric vehicles [R]. Chicago: Society

- of Automotive Engineers, 2017.
- [4] BARROS E P, LECOCQ M, DE DIOS ÁLVAREZ M, *et al.* User-centric electrical vehicle thermal conditioning strategy based on close comfort elements in cold environment: thermal manikin and human participants assessment [J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2024, 64: 105435.
- [5] 庄国华, 梁长裘, 王达成, 等. 基于EHT等效温度的夏季乘员舱热舒适性研究[C]//2024中国汽车工程学会汽车空气动力学分会学术年会论文集. 北京: 中国汽车工程学会汽车空气动力学分会, 2024: 217-226.
- ZHUANG Guohua, LIANG Changqiu, WANG Dacheng, *et al.* Study on thermal comfort of summer attendant cabin based on EHT equivalent temperature [C]// 2024 Annual Meeting of Automotive Aerodynamics Branch of China Society of Automotive Engineering. Beijing: Automotive Aerodynamics Branch of China Society of Automotive Engineering, 2024: 217-226.
- [6] 程思淇. 基于热舒适性的汽车空调系统能耗分析[D]. 长春: 吉林大学, 2024.
- CHENG Siqi. Energy consumption analysis of automobile air conditioning system based on thermal comfort [D]. Changchun: Jilin University, 2024.
- [7] LIU H, WANG S, SU Q. Characteristics optimization of automotive air conditioning based on dynamic thermal comfort in complex thermal environment [J]. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2025, 60: 103430.
- [8] 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.
- WANG Guohua, SANG Guohui, ZHANG Yingchao, *et al.* Multi-parameter optimization analysis of the factors influencing the thermal comfort of the automobile occupant cabin [J]. *Automotive Engineering*, 2023, 45(11): 2023.
- [9] LU Y, WANG G, SANG G H, *et al.* Research on low energy joint optimization of dynamic thermal environment coupled with passenger cabin and air conditioning systems [J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2024, 63: 105332.
- [10] WAN Q, ZHANG Y, WU S. Research on non-isothermal jet air supply method for human thermal comfort regulation in commercial vehicle based on localized air conditioning system [J]. *International Journal of Automotive Technology*, 2024, 25(6): 1399.
- [11] CHEN S, XUE D, LI Q, *et al.* Thermal comfort of automobile driver based on local air conditioning vent arrangement [J]. *International Journal of Automotive Technology*, 2023, 24(4): 945.
- [12] MAO Y, WANG J, LI J. Experimental and numerical study of air flow and temperature variations in an electric vehicle cabin during cooling and heating [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 137: 356.
- [13] 李伟健. 乘员人体热感觉计算模型及其应用研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2023.
- LI Weijian. The occupant human thermal sensation computing model and its application [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2023.
- [14] RODI W. Experience with two-layer models combining the $k-\epsilon$ model with a one-equation model near the wall [C]// 29th Aerospace Sciences Meeting. Reno, NV: AIAA, 1991: 1-12.
- [15] STOLWIJK J A. Temperature regulation in man; a theoretical study [J]. *Pflügers Arch: European Journal of Physiology*, 1966, 291(2): 129.
- [16] 赵兰萍, 郑振鹏, 徐鑫, 等. 基于驾乘人员热感觉的车内空调送风参数设计[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2021, 49(5): 721.
- ZHAO Lanping, ZHENG Zhenpeng, XU Xin, *et al.* Design of air supply parameters in vehicle cabin based on human thermal sensation [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2021, 49(5): 721.
- [17] HAN T, HUANG L, KELLY S, *et al.* Virtual thermal comfort engineering[R]. Detroit: SAE, 2001.
- [18] WYON D P. Use of thermal manikins in environmental ergonomics [J]. *Scandinavian Journal of Work Environment & Health*, 1989, 15: 84.
- [19] 杨志刚, 林赵敏, 赵兰萍. 基于等效均匀温度的车内热环境分析[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2019, 47(11): 1633.
- YANG Zhigang, LIN Zhaomin, ZHAO Lanping. Analysis of thermal environment in vehicle based on equivalent homogenous temperature [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2019, 47(11): 1633.
- [20] FODA E, SIREN K. A thermal manikin with human thermoregulatory control: implementation and validation [J]. *International Journal of Biometeorology*, 2012, 56(5): 959.
- [21] NILSSON H O. Thermal comfort evaluation with virtual manikin methods [J]. *Building and Environment*, 2007, 42(12): 4000.