

冬季夜间乘员舱内热环境及人体热舒适性研究

杨志刚^{1,3}, 徐鑫^{1,2}, 赵兰萍², 林赵敏¹

(1. 同济大学 上海地面交通工具风洞中心, 上海 201804; 2. 同济大学 机械与能源工程学院, 上海 201804;
3. 北京民用飞机技术研究中心, 北京 102211)

摘要: 采用试验与数值模拟相结合的方法对冬季夜间乘员舱内热环境不均匀性进行了研究, 得到不同送风模式下乘员舱内温度、速度不均匀度。接着基于 Stolwijk 人体热调节模型, 采用 Berkeley 热舒适评价模型对乘员热舒适状态进行模拟, 对比分析了 2 种送风方式下的人体热舒适性。最后通过对实际送风工况、基于相同送风焓值的等温送风工况以及基于驾驶员前方等效来流的均匀热环境工况的研究, 发现在不均匀热环境下人体更易处于不舒适的状态。

关键词: 乘员舱; 热舒适性; 不均匀性; 送风模式

中图分类号: U461.1

文献标志码: A

Study on Thermal Environment and Thermal Comfort of Passenger Compartment in Winter Night

YANG Zhigang^{1,3}, XU Xin^{1,2}, ZHAO Lanping², LIN Zhaoming¹

(1. Shanghai Automotive Wind Tunnel Center, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China; 3. Beijing Aeronautical Science & Technology Research Institute, Beijing 102211, China)

Abstract: The thermal environment inhomogeneity of the cabin in winter night was studied by the method of combining experiment and numerical simulation. The temperature and velocity inhomogeneity of the cabin in different air supply modes were obtained. Then, based on Stolwijk human thermal regulation model, the Berkeley thermal comfort evaluation model is adopted to simulate the thermal comfort state of passengers, and the thermal comfort under two air supply modes was analyzed. Finally, the actual air supply condition, the isothermal air supply condition based on the same enthalpy and the uniform thermal environment condition based on the equivalent flow in front of the driver were compared and analyzed. It is found that the occupant is more

likely to be in an uncomfortable state in an uneven thermal environment.

Key words: passenger compartment; thermal comfort; inhomogeneity; air supply mode

满足人员热舒适性要求是汽车乘员舱内热环境设计的基本目标。由于汽车乘员舱内热环境受外界气候影响较大且内部空间狭小使得乘员热舒适性的实现难度较大。对电动汽车来讲, 为满足人员热舒适而消耗的空调能耗会使续航里程下降 18.0%~53.7%^[1-2]。传统的基于温度控制的乘员舱内热环境设计方法已无法应对电动汽车发展的需求, 乘员舱内热环境控制已成为电动汽车行业面临的一个全新挑战。

国内外的学者对乘员舱内热环境及人体热舒适性进行了一些试验与仿真计算研究。文献[4-5]建立了半尺度汽车模型, 通过试验与仿真的方法对比了乘员舱内的流场和温度场, 并用室内气候贡献率 (contribution ratio of indoor climate, CRI) 方法分析了各边界对整体温度场的贡献; 张文灿^[6]通过全年车内热环境的测试, 分析了气候参数对车内太阳辐射强度以及温、湿度分布的影响规律; 朱冰^[7]通过 28 种不同太阳辐射的工况分析了太阳辐射对乘员舱内热环境的影响; 宋亚军等^[8]采用人体局部当量温度作为热舒适性评价指标, 分析了太阳辐射对乘员舱内热环境和热舒适性的影响并提出了窗户玻璃的改进方案; Currell 等^[9]将乘员舱的热-流场数值计算结果与乘客的热生理学模型进行联合仿真, 计算出乘员的热舒适性, 并且对不同的舱内几何参数进行了比较; 薛铁龙^[10]使用预测平均投票数及不满意者的百分数 (predicted mean vote-predicted percentage

收稿日期: 2018-05-07

基金项目: 上海市地面交通工具空气动力学与热环境重点实验室科研计划(18DZ2273300)

第一作者: 杨志刚(1961—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为车身与空气动力学。E-mail: zhangyang@tongji.edu.cn

通信作者: 赵兰萍(1967—), 女, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为汽车空调及换热器。E-mail: lanpingzhao@tongji.edu.cn

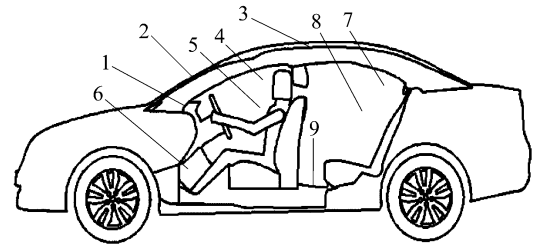
dissatisfied, PMV-PPD)热舒适性指标对车室内热舒适性进行评价,分析了不同送风温度和空气流速对乘员热舒适状态的影响;Han等^[11]基于Stolwijk的人体模型开发了预测乘员热舒适性的虚拟热舒适软件;谢方^[12]通过真人乘员舱内试验的手段,研究了车内人体热舒适性评价模型,对比分析了当量均匀温度(equivalent homogeneous temperature, EHT)和PMV-PPD热舒适性评价指标与主观热舒适性问卷结果的差距.上述相关文献往往注重最后的乘员热舒适性指标,缺乏对中间环节和重要数据的剖析.由于乘员舱内人体热舒适性影响因素众多,中间相关信息的剖析有助于车内热舒适性形成机理的进一步揭示.

本文采用试验与数值模拟相结合的方法,对冬季夜间乘员舱内热环境不均匀性及人体热舒适状态进行研究,对空车不均匀热环境特性、不同送风模式下的乘员热舒适性以及热舒适的影响因素展开分析.

1 模型及验证

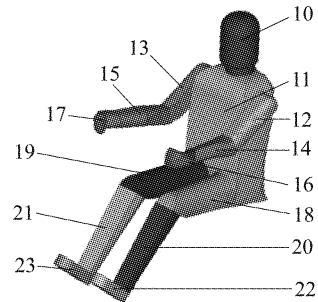
1.1 试验方法

试验车长宽高分别为4.52 m、1.78 m、1.49 m.试验在同济大学试车场旁进行,试验时间为2018年1月11日,室外环境温度及相对湿度分别为0℃~5℃和30%.试验包括空调吹面模式与吹脚模式2种工况,空调设置为最高温度与最高风速,参与测试人员3名.主要测量参数包括:壁面温度、乘员身体各节段对应的空气温度和人体各节段的皮肤表面温度.壁面及空气温度测点布置如图1a所示,其中测点1~3为车内壁面温度,分别对应仪表板、挡风玻璃、车顶中部温度;测点4~9分别对应前排头部、前排胸部、前排脚部、后排头部、后排胸部和后排脚部附近的空气温度.图1b为人体皮肤表面测点位置分布图,共14个测点,分别为头部、躯干、左上臂、右上臂、左下臂、右下臂、左手、右手、左大腿、右大腿、左小腿、右小腿、左脚、右脚.试验中同时记录空调送风温度、送风速度、车内相对湿度以及车外环境温度.考虑到冬季太阳辐射较弱,计算中不考虑太阳辐射因素,试验车辆白天停放在不受太阳照射的阴影处,避免日间太阳辐射对乘员舱内热环境造成影响.试验及数据采集在夜间进行,为保证试验测量数据的准确性,从试验人员进入乘员舱内后每5 s记录一次数据,待测量数据稳定不变后认为一次试验结束.



a 车内

1. 仪表板 2. 挡风玻璃 3. 车顶中部 4. 前排头部空气
5. 前排胸部空气 6. 前排脚部空气 7. 后排头部空气
8. 后排胸部空气 9. 后排脚部空气



b 人体皮肤表面

10. 头部 11. 躯干 12. 左上臂 13. 右上臂 14. 左下臂
15. 右下臂 16. 左手 17. 右手 18. 左大腿 19. 右大腿
20. 左小腿 21. 右小腿 22. 左脚 23. 右脚

图1 测点位置分布

Fig.1 Distribution of measuring points

1.2 数值模拟方法

1.2.1 物理模型和网格划分

通过对实车的三维扫描、逆向建模获得乘员舱几何模型,利用CATIA进行几何简化与修改后,导入Hypermesh生成面网格,再将假人模型添加至乘员舱模型中.在STAR-CCM+中划分体网格,网格类型选用四面体网格加边界层网格,乘员舱体网格总数为922万,划分体网格后的乘员舱模型如图2所示.



图2 乘员舱体网格模型

Fig.2 Passenger compartment volume mesh model

1.2.2 数值模型及数据处理方法

- (1) 车内气体流动属于受限低速流动,采用

Boussinesq 模型,湍流模型选用 Realizable $k-\epsilon$ 湍流模型. 辐射模型采用 S2S 辐射模型,并且不考虑太阳辐射.

(2) 汽车乘员舱内部空间狭小,在外界环境的影响下容易使其热-流场不均匀,直接影响驾乘人员热舒适.

$$S_{dx} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m \left(\frac{X_i - X_a}{X_a}\right)^2}{m}} \quad (1)$$

式中: S_{dx} 为乘员舱内环境不均匀度; X_i 为截面 i 的平均温度或平均速度; X_a 为所有截面的平均温度或平均速度; m 为截面数量.

(3) 人体热调节模型选用 Stolwijk^[13]提出的人类生理温度调节模型,该模型将人体分为头、躯干、左上臂、右上臂、左下臂、右下臂、左手、右手、左大腿、右大腿、左小腿、右小腿、左脚、右脚共 14 个节段,每个节段分为核心层、肌肉层、脂肪层及皮肤层.

(4) 人体热舒适性评价模型采用伯克利的热舒适性评价模型^[14],式(2)为局部热感觉回归公式.

$$S_l = 8 \left\{ 1 + e^{-C_1(T_{sl} - T_{sls}) - K_1[(T_{sl} - T_{sa}) - (T_{sls} - T_{sas})]} \right\}^{-1} - 4 + C_{2i} \frac{dT_{sl}}{dt} + C_{3i} \frac{dT_c}{dt} \quad (2)$$

式中: S_l 为局部热感觉; T_{sl} 为局部皮肤表面温度, $^{\circ}\text{C}$; T_{sls} 为设定的局部皮肤表面温度, $^{\circ}\text{C}$; T_{sa} 为平均皮肤温度, $^{\circ}\text{C}$; T_{sas} 为设定的平均温度, $^{\circ}\text{C}$; T_c 为核心温度, $^{\circ}\text{C}$; C_1 、 K_1 、 C_{2i} 、 C_{3i} 为常数回归系数; t 为时间,s.式(3)为局部热舒适指标 C_L 的回归公式.

$$C_L = \left[\left(\frac{-4 - (C_6 + C_7 | S_o |)}{|(-4 + C_3 | S_o | + C_8)|^n} - \frac{-4 - (C_6 + C_7 | S_o |)}{|(4 + C_3 | S_o | + C_8)|^n} \right) \div (e^{15(S_1 + C_{31} | S_o | + C_8)} + 1) + \frac{-4 - (C_6 + C_7 | S_o |)}{|(4 + C_3 | S_o | + C_8)|^n} \right] \cdot (S_1 + C_3 | S_o | + C_8)^n + C_6 + C_7 | S_o | \quad (3)$$

式中: $|S_o|$ 为整体热感觉指标; C_6 、 C_7 、 C_3 、 C_8 、 n 为常数回归系数,且整体热感觉正负不同时, C_3 和 C_7 的数值不同.式(4)为整体热感觉指标的回归公式.

$$S_o = \frac{\sum W_i S_l}{\sum W_i} \quad (4)$$

式中: W_i 为各部位的影响权重.

Berkeley 的整体热舒适与局部热不舒适相关,而不是局部热舒适.整体热舒适受身体最不舒适部位的影响较大.规则一是整体热舒适为 2 个最小局部热舒适的平均值;规则二是当第二小热舒适值大于 -2.5 且试验者可以控制热环境或者热环境是瞬

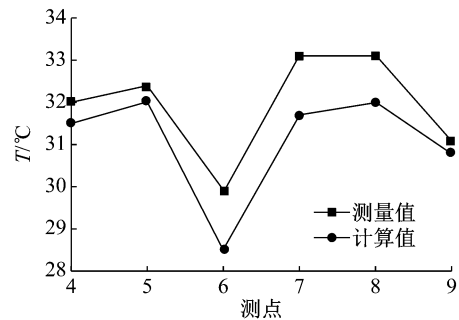
态时,整体热舒适为 2 个最小局部热舒适与最大热舒适的平均值.

1.2.3 边界条件和其他设置

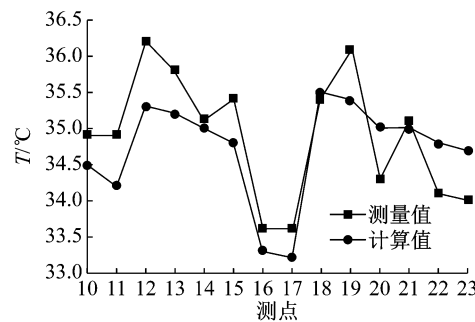
吹面模式 4 个出风口按照试验实测设置,速度入口均为 $7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,温度分别为 $35.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $40.6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $41.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $38.9 \text{ }^{\circ}\text{C}$.吹脚模式 2 个出风口速度为 $7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,温度为 $38 \text{ }^{\circ}\text{C}$.环境温度为 $1.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$,空气相对湿度为 30%.人体模型根据试验人员设置为身高 1.75 m ,衣服热阻为 $0.11 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$,新陈代谢率为 1.24 Met .

1.3 模型验证

图 3 为试验与数值计算的对比结果,可以看出空气温度最大误差在前排脚部,具体数值为 $1.4 \text{ }^{\circ}\text{C}$;皮肤表面温度最大误差在左上臂,数值为 $0.9 \text{ }^{\circ}\text{C}$.其他位置的测量与计算结果误差较小.可以看出,试验与数值模拟结果二者基本吻合.



a 空气温度



b 皮肤表面温度

图 3 试验与数值计算对比

Fig.3 Comparison between test and numerical calculation

2 结果与分析

2.1 空车不均匀热环境特性

对吹面模式及吹脚模式下的空车内热环境进行模拟.取以下截面来分析乘员舱内热环境的不均匀性, X 方向共 3 个截面,分别为前、后排乘客胸前位置截面: $X=2.200$ 、 $X=3.000$; Y 方向共 4 个截面,

分别为 4 个送风口中心截面: $Y = -0.620$ 、 $Y = -0.100$ 、 $Y = 0.100$ 、 $Y = 0.620$; Z 方向共 3 个截面, 分别为脚部、胸部及头部高度截面: $Z = 0.336$ 、 $Z = 0.690$ 、 $Z = 1.000$ 。各截面平均温度及平均速度见表 1。从表中可以看出吹面模式下 X 、 Y 、 Z 方向上均呈现出一定的温度梯度。由于空调送风速度较大, 后排空气温度高于前排空气温度 $1.3\text{ }^{\circ}\text{C}$; 副驾驶侧的送风温度高于驾驶员侧, 使得副驾驶侧的空气温度高于驾驶员侧; 而因为热空气密度小, 上部截面空气平均温度比下部空气温度高 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。相比吹面模式, 吹脚模式 X 、 Y 、 Z 各向温差均较小, 后排空气温度高于前排 $0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$; Y 方向上温差在 $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 至 $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$; 高度方向上最大温差为 $0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$, 温度分布相对均匀。速度不均匀度方面, 吹面模式下 X 方向由于较大的送风速度, 使得后排气流速度大于前排; 而 Y 方向上由于受到座位的阻挡, $Y = -0.620$ 截面平均速度最小; 高度方向上, 头部高度截面大于脚部高度截面大于胸部高度截面; 吹脚模式下 X 方向由于气流受限, 后排的空气速度小于前排; Y 方向上与吹面模式相同, $Y = -0.620$ 截面平均速度最小; 高度方向上由于送风方式的改变, 使得胸部高度截面的空气流动速度大于脚部高度截面处、大于头部高度截面处。吹面模式乘员舱内热环境温度不均匀度为 1.65% , 速度不均匀度为 21.22% ; 吹脚模式乘员舱内热环境温度不均匀度为 0.75% , 速度不均匀度为 31.84% 。乘员舱内热环境呈现出前后、左右、高度上的不均匀性, 且速度不均匀性大于温度不均匀性。

表 1 空车各截面平均温度、速度

Tab.1 Average temperature and speed of each section in empty car

| 模式 | 位置 | 平均温度/ $^{\circ}\text{C}$ | 平均速度/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ |
|----|------------|--------------------------|--|
| 吹面 | $X=2.200$ | 31.4 | 0.60 |
| | $X=3.000$ | 32.7 | 0.83 |
| | $Y=-0.620$ | 30.8 | 0.75 |
| | $Y=-0.100$ | 31.9 | 0.99 |
| | $Y=0.100$ | 32.3 | 0.74 |
| | $Y=0.620$ | 32.2 | 1.00 |
| | $Z=0.336$ | 31.6 | 0.59 |
| | $Z=0.690$ | 31.9 | 0.53 |
| | $Z=1.000$ | 32.1 | 0.89 |
| 吹脚 | $X=2.200$ | 30.3 | 0.22 |
| | $X=3.000$ | 30.9 | 0.16 |
| | $Y=-0.620$ | 31.0 | 0.28 |
| | $Y=-0.100$ | 30.7 | 0.34 |
| | $Y=0.100$ | 31.0 | 0.31 |
| | $Y=0.620$ | 30.8 | 0.35 |
| | $Z=0.336$ | 30.4 | 0.17 |
| | $Z=0.690$ | 30.8 | 0.39 |
| | $Z=1.000$ | 30.7 | 0.16 |

2.2 不同送风模式下的车内热舒适性分析

在吹面模式下, 人体皮肤表面温度范围为 $34.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 至 $36.6\text{ }^{\circ}\text{C}$, 副驾驶侧的温度高于驾驶员这一侧, 这是由于实际情况下副驾驶一侧的送风温度要高于驾驶员侧而造成。后排乘客的皮肤温度明显高于前排, 这与空车情况下乘员舱内的空气温度分布相对应。在吹脚模式下, 由于进入乘员舱内的热量减少, 人体皮肤表面温度降为 $29.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 至 $34.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。2 个送风口风量及温度一致, 所以驾驶员侧和副驾驶侧并没有出现吹面模式的热感觉与热舒适性不对称情况。前排乘客靠近中控的脚部以及小腿因为正对下出风口的原因, 温度要高于另一侧。从表 2 可以看出, 吹面模式驾驶员、副驾、左乘、右乘的整体热感觉为 1.21 、 1.30 、 1.25 、 1.28 ; 整体热舒适为 -1.09 、 -1.02 、 -1.55 、 -1.50 。

表 2 2 种吹风模式下各乘员整体热感觉指标与整体热舒适指标

Tab.2 Overall thermal sensation and overall thermal comfort of each occupant under the two blowing modes

| 模式 | 位置 | 整体热感觉指标 | 整体热舒适指标 |
|----|-----|---------|---------|
| 吹面 | 驾驶员 | 1.21 | -1.09 |
| | 副驾驶 | 1.30 | -1.02 |
| | 左乘客 | 1.25 | -1.55 |
| | 右乘客 | 1.28 | -1.50 |
| 吹脚 | 驾驶员 | 0.14 | -1.00 |
| | 副驾驶 | 0.16 | -1.06 |
| | 左乘客 | 0.19 | -0.67 |
| | 右乘客 | 0.24 | -0.79 |

吹脚模式驾驶员、副驾、左乘、右乘的整体热感觉为 0.14 、 0.16 、 0.19 、 0.24 ; 整体热舒适为 -1.00 、 -1.06 、 -0.67 、 -0.79 。对比 2 种送风模式下的人体皮肤表面温度及整体热感觉与整体热舒适, 吹脚模式能够满足冬季乘员舱内热负荷要求且热舒适性要优于吹面模式, 吹面模式乘员的整体热感觉值均大于吹脚模式, 这是因为吹面模式的送风温度与总送风量均要大于吹脚模式。

表 3 列出了 2 种送风模式下各节段的皮肤表面温度的计算结果, 可以看出吹面模式下各节段皮肤表面温度均高于吹脚模式。吹面模式下温度最高的部位为右边乘员左手, 温度为 $36.6\text{ }^{\circ}\text{C}$; 温度最低的部位为驾驶员躯干, 温度为 $34.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。吹脚模式下温度最高的部位为右边乘员左大腿, 温度为 $34.9\text{ }^{\circ}\text{C}$; 温度最低的部位为驾驶员右手, 温度为 $29.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。2 种模式下温度相差最大的为驾驶员的右手, 温差为 $6.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

表 3 各节段皮肤表面温度

Tab.3 Skin surface temperature at each segment °C

| 模式 | 部位 | 驾驶员 | 副驾驶 | 左乘客 | 右乘客 | |
|-----|-----|------|------|------|------|------|
| 吹面 | 头部 | 35.5 | 36.0 | 35.5 | 36.0 | |
| | 躯干 | 34.7 | 34.8 | 34.9 | 35.1 | |
| | 左上臂 | 35.4 | 35.6 | 35.3 | 35.6 | |
| | 右上臂 | 35.7 | 35.5 | 35.7 | 35.4 | |
| | 左下臂 | 35.3 | 35.4 | 35.3 | 35.5 | |
| | 右下臂 | 35.3 | 35.4 | 35.7 | 35.3 | |
| | 左手 | 35.3 | 35.8 | 35.8 | 36.6 | |
| | 右手 | 35.8 | 35.8 | 36.4 | 36.4 | |
| | 左大腿 | 35.9 | 36.0 | 36.2 | 36.1 | |
| | 右大腿 | 35.9 | 36.2 | 36.4 | 36.1 | |
| | 左小腿 | 35.7 | 35.9 | 36.2 | 35.8 | |
| | 右小腿 | 35.8 | 35.9 | 36.3 | 35.9 | |
| | 左脚 | 36.2 | 36.4 | 36.5 | 36.2 | |
| | 右脚 | 36.2 | 36.3 | 36.5 | 36.2 | |
| | 吹脚 | 头部 | 33.5 | 33.5 | 33.4 | 33.5 |
| | | 躯干 | 32.9 | 33.0 | 33.2 | 33.2 |
| 左上臂 | | 34.3 | 34.5 | 34.4 | 34.7 | |
| 右上臂 | | 34.5 | 34.3 | 34.7 | 34.4 | |
| 左下臂 | | 34.1 | 34.3 | 34.3 | 34.6 | |
| 右下臂 | | 34.2 | 34.2 | 34.6 | 34.3 | |
| 左手 | | 29.8 | 30.0 | 30.7 | 31.0 | |
| 右手 | | 29.5 | 29.6 | 30.9 | 30.7 | |
| 左大腿 | | 34.4 | 34.5 | 34.8 | 34.9 | |
| 右大腿 | | 34.5 | 34.4 | 34.9 | 34.8 | |
| 左小腿 | | 34.0 | 34.4 | 34.3 | 34.4 | |
| 右小腿 | | 34.4 | 34.1 | 34.4 | 34.4 | |
| 左脚 | | 32.1 | 34.0 | 32.7 | 32.8 | |
| 右脚 | | 33.9 | 32.2 | 32.7 | 32.7 | |

2.3 乘员热舒适性影响因素分析

为了进一步说明送风温度及送风热环境均匀性对乘员热舒适性的影响,对实际送风工况(吹面)、基于相同送风焓值的等温送风工况以及基于驾驶员前方等效来流的均匀热环境工况进行了对比分析.其中,为模拟基于驾驶员前方等效来流的均匀热环境工况,建立了如图 4 所示的基于驾驶员前方等效来流均匀热环境,计算域为长宽高分别为 5.0 m、2.8 m、2.4 m 的长方体,人到计算域出口的距离为到入口距离的 2 倍.均匀热环境的热边界条件热阻、对流换热系数等按照试验工况下的面积平均设置,入口送风温度、速度按照等效面的平均温度、速度设置(等效面为试验工况下驾驶员胸前截面, $X=2.200$ 截面).

计算结果表明,在实际送风工况下,人体皮肤表面温度范围为 33.2 °C 至 35.5 °C,其整体热感觉为 0.73,整体热舒适为 -0.19;而在基于相同送风焓值的等温送风工况下,人体表面温度范围为 34.5 °C 至 36.0 °C,整体热感觉为 1.03,整体热舒适为 -0.73.出现该情况的原因是试验工况下驾驶员侧两出风口

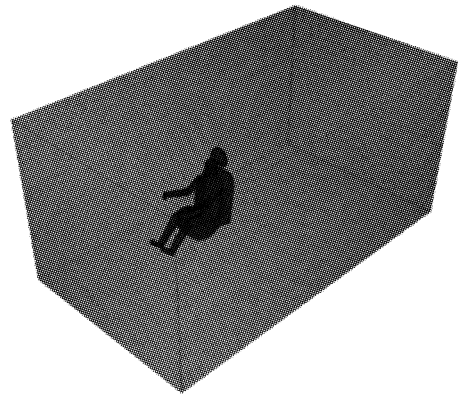


图 4 等效来流均匀热环境

Fig.4 Equivalent incoming flow uniform thermal environment

的送风温度为 35.8 °C 和 40.6 °C,低于副驾驶侧两出风口的送风温度 41.1 °C 和 38.9 °C.而在基于相同送风焓值的等温送风工况,其送风温度为 39.1 °C,对于驾驶员位置来说等同于送风温度升高,所以其皮肤表面温度升高,整体热感觉也增大.以上对比结果说明送风温度对乘员热舒适性的影响是显著的.而在均匀热环境下,人体皮肤表面温度范围为 34.0 °C 至 35.8 °C,其整体热感觉为 0.95,整体热舒适为 -0.49.相比相同送风焓值的等温送风工况,人体表面温度范围减小,整体热感觉也降低了 0.08,整体热舒适增大了 0.24.说明对于乘员舱这类不均匀热环境,人员热舒适的实现难度较理想均匀热环境高.

3 结论

(1) 在较高温的送风射流及自然对流共同作用下,冬季乘员舱内热环境呈现出前后、左右、高度上的不均匀性.吹面模式下乘员舱内热环境温度不均匀度为 1.65%,速度不均匀度为 21.22%;吹脚模式下乘员舱内热环境温度不均匀度为 0.75%,速度不均匀度为 31.84%,可以看出速度不均匀性明显大于温度不均匀性.

(2) 与吹面模式相比较,吹脚模式下乘员能获得更好的热舒适,吹面模式乘员的整体热感觉值均大于吹脚模式,这是因为吹面模式的送风温度与风量均大于吹脚模式.

(3) 通过对实际送风工况、基于相同送风焓值的等温送风工况以及基于驾驶员前方等效来流的均匀热环境工况的对比分析,发现送风温度对人员热舒适性的影响显著,在不均匀热环境下人体更易处

于不舒适的状态.

参考文献:

- [1] JEFFERS M A, CHANEY L, RUGH J P. Climate control load reduction strategies for electric drive vehicles in warm weather [J]. SAE International, 2015;10.4271/2015-01-0355.
- [2] LAJUNEN A. Energy efficiency and performance of cabin thermal management in electric vehicles [J]. SAE International, 2017;10.4271/2017-01-0192.
- [3] OZEKI Y, YANG J, NAGANO H, *et al.* Ventilation characteristics of modeled compact car part 1 Airflow velocity measurement with PIV [J]. SAE International Journal of Passenger Cars-Mechanical Systems, 2008, 1(1):631.
- [4] NAGANO H, KATO S, ZHU S, *et al.* Ventilation characteristics of modeled compact car part 2 Estimation of local ventilation efficiency and inhaled air quality [J]. SAE International Journal of Passenger Cars-Mechanical Systems, 2008, 1(1):623.
- [5] NAGANO H, INOUE M, OZEKI Y, *et al.* Ventilation characteristics of modeled compact car part 6-Numerical analysis of heat transfer characteristics by CRI [J]. SAE International, 2012;10.4271/2012-01-0640.
- [6] 张文灿. 汽车乘坐空间热环境与乘员热舒适性分析关键技术研究[D]. 广州:华南理工大学, 2013.
ZHANG Wencan. Study on the key technology of thermal environment and occupant's thermal comfort analysis in vehicle cabins[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013.
- [7] 朱冰. 汽车乘坐空间热环境动态特性研究[D]. 重庆:重庆交通大学, 2016.
ZHU Bing. Study on dynamic characteristics of space thermal environment of automobile [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2016.
- [8] 宋亚军, 赵兰萍, 杨志刚, 等. 太阳辐射对车室内热舒适性的影响分析与改进[J]. 计算机仿真, 2014, 31(7):148.
SONG Yajun, ZHAO Lanping, YANG Zhigang, *et al.* Analysis and improvement of the effects of solar incidence on cabin thermal comfort[J]. Computer Simulation, 2014, 31(7):148.
- [9] CURRLE J. Numerical simulation of the flow in a passenger compartment and evaluation of the thermal comfort of the occupants[J]. Journal of Building Physics, 1997, 25(3):209.
- [10] 薛铁龙. 某轿车乘员舱内环境舒适性评价与分析研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2014.
XUE Tielong. Analysis and evaluation on passenger compartment interior comfort[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2014.
- [11] HAN T, HUANG L, KELLY S, *et al.* Virtual thermal comfort engineering [J]. Center for the Built Environment, 2001;10.4271/2001-01-0588.
- [12] 谢方. 基于真人测试的车内人体热舒适性实验研究[D]. 广州:华南理工大学, 2013.
XIE Fang. Research of human thermal comfort in automobile based on human body measurement[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013.
- [13] STOLWIJK J A, HARDY J D. Temperature regulation in man—A theoretical study[J]. Pflügers Archiv Für Die Gesamte Physiologie Des Menschen Und Der Tiere, 1966, 291(2):129.
- [14] ZHANG H, HUIZENGA C, ARENS E, *et al.* Thermal sensation and comfort in transient non-uniform thermal environments. [J]. European Journal of Applied Physiology, 2004, 92(6):728.