

基于STAR-CCM+的某SUV汽车热舒适的研究

叶立, 张志军, 张梦伢, 叶欢, 张文韬

上海理工大学, 上海
Email: 2649250628@qq.com

收稿日期: 2021年4月6日; 录用日期: 2021年8月18日; 发布日期: 2021年8月25日

摘要

以某SUV 6座纯电动汽车为研究对象, 用仿真软件对车内制冷及舒适性进行研究, 考虑人体模型, 采用PMV-PPD和空气龄(MAA)对乘客舱内热环境的舒适性情况进行分析和评价。结果显示, 车内冷空气流速、体表温度分布在舒适的范围内。通过分析评价指标的分布情况, 可以清晰地了解车内舒适性分布情况, 较实验具有更节约成本、缩短时效的优势。

关键词

SUV 6座汽车, 热舒适性, PMV-PPD, MAA

Research on Thermal Comfort of an SUV Based on STAR-CCM+

Li Ye, Zhijun Zhang, Mengya Zhang, Huan Ye, Wentao Zhang

University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai
Email: 2649250628@qq.com

Received: Apr. 6th, 2021; accepted: Aug. 18th, 2021; published: Aug. 25th, 2021

Abstract

Taking an SUV 6-seat pure electric vehicle as the research object, the cold and comfort of the whole vehicle are studied by simulation. The human body model is introduced, and the thermal environment comfort in the passenger compartment is analyzed and evaluated by using PMV-PPD and MAA. The simulation results show that the distribution of cold air velocity and passenger body surface temperature in the cabin is comfortable. Through the analysis of the distribution of evaluation indicators, we can clearly understand the distribution of comfort in the passenger compartment, which has the advantages of more cost saving and shorter time effectiveness than the experiment.

Keywords

SUV 6-Seat Vehicle, Thermal Comfort, PMV-PPD, MAA

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

目前, 电动汽车已经越来越受群众的喜爱, 但其内部乘坐热舒适性也越来越为人们所关注。现在汽车为了保证驾驶乘客驾驶安全及审美疲劳, 而增大汽车车窗来开阔驾乘人员的视野, 但却增大了太阳辐射, 影响乘坐人员的热舒适性, 甚至影响驾驶安全, 所以对乘客舱舒适性研究极为重要[1]。汽车室内的舒适性主要与空气的温度、速度、质量及太阳辐射有关[2]。热舒适性在炎热和寒冷的气候表现的最为明显, 车内温度过高、过低都会影响人的舒适性[3]。近年, 有关汽车乘客舱及空调的研究比较多, 大多在建立三维汽车模型的基础上对送风结构即参数进行研究, 如文献[4] [5] [6] [7]通过建立模型, 研究不同送风条件对车内的热舒适性的影响。文献[8]通过 CFD 软件建立单个通风口的地上、地下两个相同有限空间内的气流运动状态, 采用不同网格长度对比分析有限空间内的气流运动, 得出外界的风量和风速越大, 内部空气循环的越彻底。车内热舒适不能仅考虑送风结构变化对其的影响, 还应综合考虑太阳辐射和人体热生理情况, 文献[9] [10]考虑了人体生理热, 引入 PMV-PPD 等多种热舒适性指标对有限空间的热环境进行评估。文献[11] [12] [13]综合考虑了太阳辐射和人体生理热对室内热环境的影响, 通过建立仿真模型以及引入评价指标对有限空间内的空气质量和热舒适性进行评估, 得出室内环境的舒适性情况。

综上所述, 这些研究大多侧重于风道的改造, 对于综合考虑太阳辐射和人体自身因素对热环境影响的研究很少, 不能精确地反映出热环境的舒适性。因此, 本文对 SUV 6 座汽车内部的热舒适性进行模拟研究, 并综合引入各种评价指标对车内的舒适性进行评估, 具有一定的实用意义。

2. 模型的建立

2.1. 几何模型及网格划分

本文使用 CATIA 软件对 SUV 汽车和假人模型进行简化, 简化过程中保留制冷吹面的风道, 且风道密封良好, 如图 1 为简化后的 SUV 汽车模型。然后对整车和假人模型网格划分, STAR-CCM+中, 整个计算域内体网格数为 850 万。图 2 为假人及汽车网格模型。

2.2. 数学模型

STAR-CCM+中有自带的数值求解器, 可以精确模拟车内的热舒适情况。车内空气流速较小, 使用 $k-\varepsilon$ 湍流模型, 内部流体可看作三维不可压缩流[14]; 乘客舱内的空气为辐射透明介质, 符合灰体辐射。求解方程如下:

连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

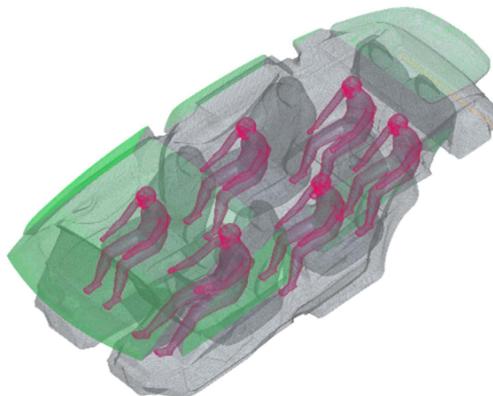


Figure 1. Curve: system result of standard experiment
图 1. SUV 汽车三维几何模型

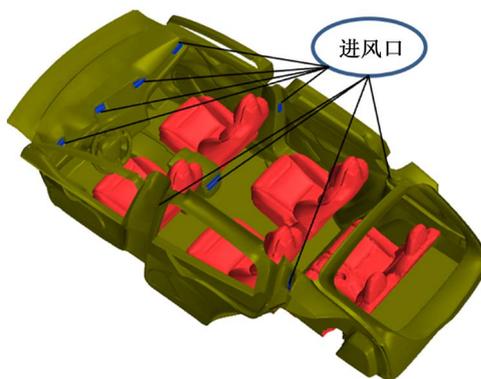


Figure 2. Curve: system result of standard experiment
图 2. 假人及车舱网格划分示意图

动量方程:

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_i} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right) \quad (2)$$

能量方程:

$$\frac{\partial \rho T}{\partial t} + \frac{\partial \rho T u_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

式中, ρ 是气流密度; μ 是动力粘度; P 为压力, P ; T 为温度, $^{\circ}\text{C}$; t 为时间, s ; x_i 为 x 、 y 、 z 方向的张量; k 为热传导; c_p 是比热容。

3. 边界参数及评价指标

3.1. 边界参数

本文将进口设为质量流量入口, 出口设为分散流出口, 采用瞬时计算 3900 s。在 STAR-CCM+仿真软件中有自带的参数设置框。

3.2. 评价指标

3.2.1. PMV-PPD

PMV 表示预期平均热感觉, 其将舒适状态从冷到热划分为 7 个等级, 见表 1。由于环境的舒适性因

人体的生理情况不同而异。所以不适人员比例 PPD 被提出来表达人们对热环境的不满意程度，当 PMV 在 -0.5~0.5 时，且 PPD < 15% 时，人体处于舒适状态。PMV 和 PPD 的计算如式(4)和(5)。

$$PMV = [0.028 + 0.303 \exp(-0.036M)] \cdot [M - W - E_c - E_{res} - C_{res} - H] \quad (4)$$

$$PPD = 100 - 95 \cdot \exp(-0.03353 \cdot PMV^4 - 0.2179 \cdot PMV^2) \quad (5)$$

式中， M ——人能量代谢率， W/m^2 ；

W ——人做的机械功， W/m^2 ；

E_c ——表皮及出汗的散热量， W/m^2 ；

E_{res} ——呼吸潜热损失量， W/m^2 ；

C_{res} ——呼吸显热损失量， W/m^2 ；

H ——体表对流和辐射热损失， W/m^2 。

Table 1. Comfort level of PMV evaluation index

表 1. PMV 评价指标舒适等级

PMV 指标	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
热感觉	冷	偏冷	凉	舒适	温暖	偏热	热

3.2.2. 空气龄(MAA)

空气龄为新鲜空气在有限空间内停留的时间，可通过示踪气体实验估算其值[15]。有限空间内某点的平均空气龄计算公式，单位：秒：

$$\tau = \frac{\int_0^{\infty} C(\tau) d\tau}{C_0} \quad (6)$$

式中， C_0 ——有限空间内示踪气体均匀分布时的初始浓度；

$C(\tau)$ ——当以某种特定送风方式送入新鲜空气时测得的示踪气体浓度随时间的变化。

4. 模拟结果分析

4.1. 乘客舱空气流速分布情况

图 3 为模拟过程 SUV 车内空气流动状态。可以看出，风向从风口出来后直接吹响乘客，离风口较近的部位，气流密度强，对于乘客来说吹风感较猛。图中，乘客从头部到小腿出现涡旋状回流，表现为头暖脚冷，且风口直吹的地方风速较大达到 3 m/s，人体表面最大风速达到 2.5 m/s。总体而言，乘客头部的风速相对腿脚处较高，但因热胀冷缩原理，车内温差会尽快降到合理范围；图中可以看出人体感到舒适的风速为 0.5~2 m/s，前两排乘客体表风速基本能够满足，后排乘客与 C 柱出风口的距离太近，使得乘客表面及肩部风速稍高。

4.2. 乘客舱成员体表温度分布情况

图 4 为模拟过程乘客表面的温度分布状态。图中，前排乘客腿部温度较其他乘客高，基本在 38℃ 左右。一方面是该部分新鲜空气流速较低，换热量较少；另一方面是因为前排挡风玻璃较大，腿部吸收的辐射热较多。二排分布乘客体表温度相对均匀。一方面是因为侧窗玻璃的透射率较低，吸收的辐射热较少；另一方面是因为空气流速较均匀，能够迅速降低温度。第三排乘客除后侧头部区域温度较高，其他区域的温度均匀分布。这是因为三排乘客表面风速虽然分布较均匀，但后脑勺部位吸收的辐射热较大。

可见乘客体表温度不仅与出风口温度、吹风位置有关，还与乘客舱周围玻璃透射率有关。总体而言，乘客舱处于人体舒适的温度区间内。

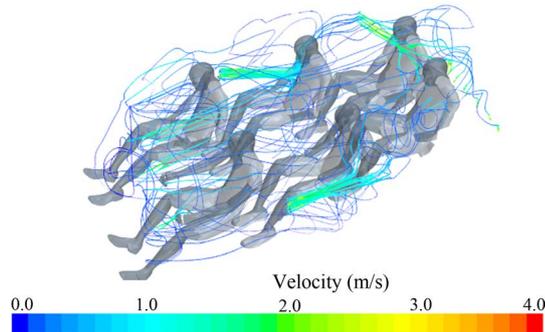


Figure 3. Schematic diagram of air flow line in vehicle
图 3. 车内空气流线示意图

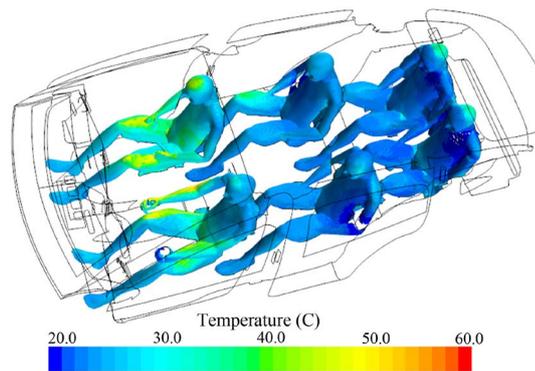


Figure 4. Passenger surface temperature
图 4. 乘客表面温度

4.3. 乘客舱平均温度分布

图 5 为车舱截面温度分布，可以看出乘客舱温度总体处在 26°C 附近，但车舱轮廓处温度要比车舱内部温度稍高。这是因为边界处直接吸收大量的太阳辐射，且又与外界高温环境进行对流换热，冷空气到达车舱边界时的流速很低，对流换热系数较小，不能及时给边界降温，故使轮廓温度高于内部温度。图中前挡风玻璃与仪表盘的夹角处温度过高，这是由于三维仿真中的网格尺寸大于该处的实际几何尺寸，因而产生计算死角，所得的温度结果失真。

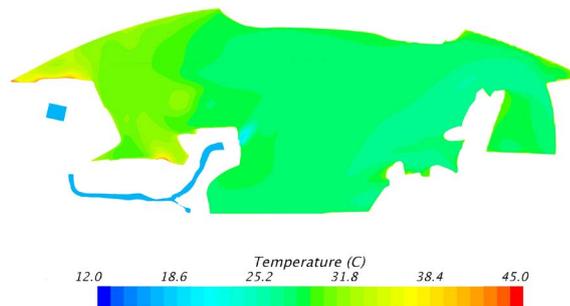


Figure 5. Cross section temperature inside vehicle
图 5. 车内横截面温度

4.4. PMV-PPD 评价指标分析

图 6 中, PMV 值基本分布在 $-0.6\sim 0.5$ 之间, 乘客处于热舒适状态。因为后两排车窗玻璃的透光率比前排玻璃低, 乘客所吸收的太阳辐射热少; 且对流换热较好, 冷空气均匀分布在体表上, 所以后两排乘客基本处于热舒适状态。前排乘客除大腿和腹部位置的 PMV 值较高, 其余处的 PMV 值处在 $[-0.5, 0.5]$ 的舒适区间内, 这是因为前挡风玻璃的透光率较高, 大腿及腹部吸收的辐射热最多, 并且该处的冷空气流速较低, 换热量较少, 热量难被带走。

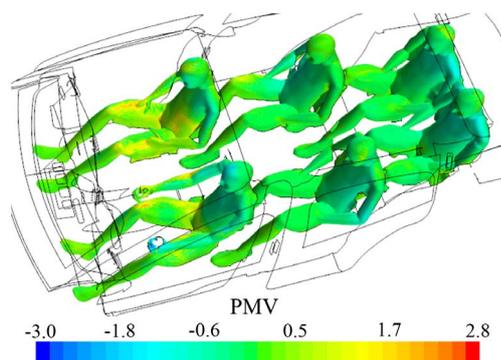


Figure 6. PMV distribution on passenger surface

图 6. 乘客表面 PMV 分布

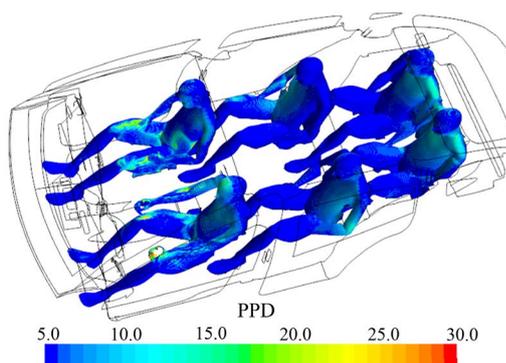


Figure 7. PPD distribution on passenger surface

图 7. 乘客表面 PPD 分布

图 7, 乘客表面 PPD 分布基本低于 15%, 可认为乘客的满意程度比较高。前排乘客除大腿及腹部的 PPD 值高于 15%, 其余位置处于满意的状态, 这是因为乘客的大腿和腹部吸收大量的太阳辐射, 且该部位的空气流速低, 换热量较少; 因后两排乘客的肩颈直对出风口, 风速感较强, 且从车窗处吸收了部分的辐射热, 使人感到极不舒适。

4.5. 空气龄(MAA)

有限空间内, 空气龄在 40 s 内被视为可接受的舒适范围。如图 8, 乘客表面的 MAA 分布在 25 s 内, 说明有限空间内的新鲜空气循环的比较顺畅, 乘客感觉比较舒服。这里是乘客表面的平均 MAA 已经达到了舒适的状态, 但是车内局部位置 MAA 较高, 如图 9, 车舱前部的 MAA 较高, 这是因为车舱前部吸收过多的太阳辐射, 且风速循环较慢, 换热量低, 导致温度太高, 空气干燥, MAA 较高。总的来说, 后两排乘客的 MAA 要比前排乘客的稍低。这是因为后排出乘客接收的新鲜冷空气较多、空气流速较均匀, 并且吸收的辐射热较少, 因此 MAA 要比前排的稍低, 感觉比较舒适。

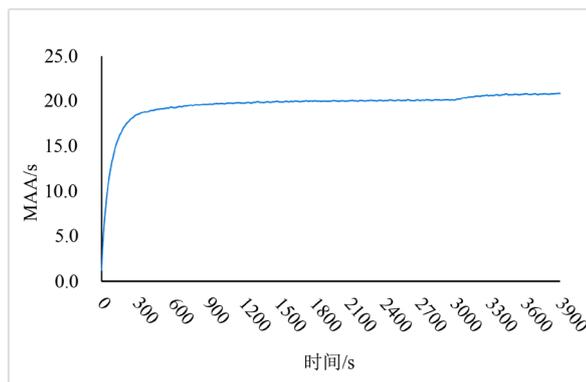


Figure 8. RH distribution of passenger surface relative humidity
图 8. 乘客表面 MAA 分布

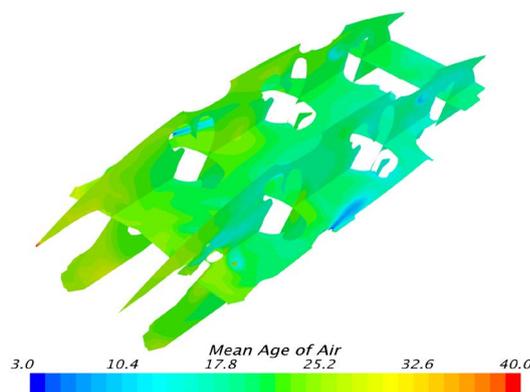


Figure 9. RH distribution of passenger surface relative humidity
图 9. 乘客表面 MAA 分布

5. 总语

本文通过 STAR-CCM+建立了三维 SUV 6 座车舱模型，引入人体模型和太阳辐射模型模拟车内热环境在高温夏季静置后分别以不同的运行方式启动时车内的热舒适性情况。总得来说，车内及乘客表面温湿度分布较均匀且舒适，稳定时平均温度在 26℃ 附近，但前排乘客的大腿及腹部位置吸收较多的辐射热，使得平均辐射温度值偏高、空气比较干燥，这是因为前挡风玻璃的透射率较大，使 PMV-PPD 的值超出了舒适的范围。同时，后排出风口的风速偏高，后排乘客的肩颈部吹风感较强，该区域的乘客 PPD 值偏高。因此，出风口温度过低以及空气流速过快都会影响乘客的乘坐热舒适性，为了满足热舒适性要求，汽车空调系统不仅需要合理控制出风口风速，还需要控制阳光进入乘员舱的辐射量。

基金项目

国家自然科学基金重点项目，51707122；上海理工大学科技发展项目，2018KJFZ179。

参考文献

- [1] Mezrhab, A. and Bouzidic, M. (2005) Computation of Thermal Comfort inside a Passenger Car Compartment. *Applied Thermal Engineering*, **26**, 1697-1704. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2005.11.008>
- [2] 林飞跃. 城市客车热舒适性空调系统结构改进[J]. 客车技术与研究, 2019, 41(3): 25-27.
- [3] 杨志刚, 徐鑫, 赵兰萍, 林赵敏. 冬季夜间乘员舱内热环境及人体热舒适性研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2019, 47(3): 408-413.

-
- [4] 杨金凤, 符永正, 周传辉. 一个中型会议室空气龄和舒适度的数值模拟研究[C]//中国制冷学会, 湖北省制冷学会, 湖北省土木建筑学会. 2007年湖北省暖通空调制冷及热能动力学术年会论文集, 2008: 159-163.
- [5] 宋晓峰, 黄学章. 风道出风口结构对客车车内流场影响的研究[J]. 客车技术与研究, 2018, 40(5): 8-11.
- [6] Noor, E.A.S., Haslinda, M.K. and Nazri, K. (2015) CFD Simulation of Air Temperature Inside a Bus Passenger Compartment. *Applied Mechanics and Materials*, **735**, 85-90. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.735.85>
- [7] 周柯. 纯电动公交车内气流分布特性及热舒适性研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- [8] 杨春丽, 刘艳. 单开口有限空间自然通风特性及其影响因素研究[J]. 安全与环境工程, 2019, 26(4): 183-189.
- [9] 张炳力, 薛铁龙, 胡忠文. 基于 PMV-PPD 与空气龄的轿车乘员舱内热舒适性分析与改进[J]. 汽车工程, 2015, 37(8): 951-958.
- [10] 谢普康, 陈洪涛, 商潭苏, 邢首辰, 刘方圆, 林好利. 基于 STAR-CCM+的某型拖拉机驾驶室热舒适性研究[J]. 拖拉机与农用运输车, 2016, 43(3): 14-17.
- [11] David, M., Francisco, J., Carlos, B. and Guerra, J.J. (2014) The Development and Validation of a Thermal Model for the Cabin of a Vehicle. *Applied Thermal Engineering*, **66**, 646-656. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.02.054>
- [12] Christian, D., Walter, S. and Martin, K. (2015) A Modular Thermal Simulation Tool for Computing Energy Consumption of HVAC Units in Rail Vehicles. *Applied Thermal Engineering*, **78**, 616-629. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.11.065>
- [13] 张竹慧. 室内平均辐射温度的建筑设计与调节[J]. 山西建筑, 2009, 35(16): 183-184.
- [14] Barbara, T.-J., Filip, B., Jose, M., Di Sciullo, F. and Payá, J. (2015) Transient Thermal Model of a Vehicle's Cabin Validated under Variable Ambient Conditions. *Applied Thermal Engineering*, **75**, 45-53. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.05.074>
- [15] Liu, T., Liu, Z., Li, G. and Zuo, Z. (2015) Comparative Study of Numerical Simulation of Indoor Thermal Environment in the Pattern of Personalized Ventilation and Stratum Ventilation. *Procedia Engineering*, **121**, 785-791. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.09.031>