

# 乘员舱驾驶员位置微环境及人体热舒适分析

杨志刚<sup>1,3</sup>, 徐鑫<sup>1</sup>, 赵兰萍<sup>2</sup>, 郑振鹏<sup>2</sup>, 林赵敏<sup>1</sup>

(1. 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; 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:** 采用实验与数值模拟相结合的方法对夏季乘员舱内驾驶员位置的微环境及人体热舒适性进行了研究。首先通过11个不同工况分析了空调送风温度、送风速度、太阳辐射强度、太阳高度角以及环境温度对驾驶员位置不同部位微环境的影响,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了模拟,得到了各影响因素对人体热感觉及热舒适的影响程度。

**关键词:** 乘员舱;微环境;热舒适性;热-流场  
**中图分类号:** U461.1

**文献标志码:** A

## Analysis on the Microenvironment and Human Thermal Comfort of the Driver Position in the Passenger Compartment

YANG Zhigang<sup>1,3</sup>, XU Xin<sup>1</sup>, ZHAO Lanping<sup>2</sup>, ZHENG Zhenpeng<sup>2</sup>, LIN Zhaoming<sup>1</sup>

(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 microenvironment and human thermal comfort of the driver position in the passenger compartment in summer were studied by means of experiment and numerical simulation. Firstly, the influence of air supply temperature and air supply velocity of air conditioner, solar radiation intensity, solar altitude angle and environmental temperature on the microenvironment of different parts of the driver's position was analyzed under 11 different working conditions. Then, based on Stolwijk human thermal regulation model, the Berkeley thermal comfort evaluation model was adopted to simulate the thermal

comfort state of passengers, and the influence degree of various influencing factors on human thermal sensation and thermal comfort was obtained.

**Key words:** passenger compartment; microenvironment; thermal comfort; thermal-flow field

汽车乘员舱内部空间狭小且外部环境复杂多变,车内热环境受到空调送风以及外界环境的影响,使得驾乘人员的热感觉和热舒适性发生改变。Roy<sup>[1]</sup>采用数值仿真的方法对乘员舱内不同传热方式及不同车体壁面对人体热舒适的影响进行了分析。Hodder等<sup>[2]</sup>从强度、光谱分布以及玻璃种类三方面研究了太阳辐射对乘员舱内人体热感觉及热舒适的影响,结果表明光谱分布的不同对人体热感觉并没有直接的作用,而太阳辐射强度每增大 $200 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ,热感觉增大1。倪冬香<sup>[3]</sup>使用SC/Tetra将乘员舱内的热环境与人体热调节模型进行迭代计算,考虑了两者的相互作用,而不是仅仅被动地将人体作为一个热边界条件。申红丽<sup>[4]</sup>以某款空调汽车乘员舱内部热环境为研究对象,分析计算了该车型所需空调制冷功率的大小。通过C语言编写了可视化预测平均投票数-不满意者的百分数(predicted mean vote-predicted percentage of dissatisfied, PMV-PPD)的UDF(用户定义函数)程序,并与FLUENT软件相结合得到了车室内部的热舒适指标分布规律。黄木生<sup>[5]</sup>考虑了窗框、门支柱等金属面直接延伸到乘员舱内部所产生的穿透热桥影响,对车身壁面热传递进行了机理性的研究。提出了ACS-DR(自适应舒适标准-气流不舒适感)准则,其较PMV-PPD准则更适用于高度非均匀瞬态的温度场。Myoung<sup>[6]</sup>

收稿日期: 2019-06-21

基金项目: 上海市专业技术服务平台项目(19DZ2290400)

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: zhigangyang@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



论文  
拓展  
介绍

等研究了局部空调系统的量化节能效果,通过调节前、顶送风比例、送风温度、送风速度等从不同角度分析了车厢内的热舒适性。张炳力等<sup>[7]</sup>对某款轿车车内三维流场和热环境进行了数值仿真,得到了速度场、温度场和PMV与PPD的分布,并对乘员舱内空气龄的分布进行计算。Moon等<sup>[8]</sup>对比分析了多波段及单波谱的辐射模型下PMV-PPD与等效温度两种热舒适评价指标,研究表明考虑多波段太阳辐射的影响,驾乘人员附近的温度上升 $1^{\circ}\text{C}\sim 2^{\circ}\text{C}$ ,等效温度能够预测乘员舱内热舒适水平的局部变化。Danca等<sup>[9]</sup>对乘员舱内各位置测量了温度、速度,计算出PMV-PPD热舒适评价指标。通过校准实验对数值模拟的结果进行了验证,但没有考虑人在乘员舱中与热环境的相互作用。

目前乘员热舒适性评价通常借用从均匀建筑热环境中发展起来的PMV-PPD评价法。而汽车乘员舱内热环境本质上呈现高度不均匀状态,PMV-PPD评价指标无法对乘员热舒适性作出客观评价。加州大学伯克利分校的Zhang<sup>[10]</sup>通过控制环境室内的109次非均匀和瞬态条件下人体实验,建立了人体局部热感觉、局部热舒适、整体热感觉与整体热舒适模型伯克利热舒适性评价模型,但目前该模型在夏季不同环境条件(特别是太阳辐射)及车内送风参数下乘员舱热舒适性评价中的应用还比较少。另一方面,人体与不均匀热环境之间的热量交换是通过皮肤周围的微环境进行的,但目前热舒适性研究中较少定量关注此微环境。

本文采用实验与数值模拟相结合的方法,分析不同送风参数及环境条件下驾驶员位置的人体热感觉与热舒适性,包括局部热感觉、局部热舒适性、整体热感觉及整体热舒适性,同时关注人体周围的微环境参数。

## 1 计算流体力学数值计算

### 1.1 网格划分及模型

针对实验用车进行3D扫描,将车身及乘员舱内的位置信息输入CATIA软件中进行逆向建模(图1)。由于本文只考虑乘员舱内部的气流组织分布及乘员热舒适性,故对轮胎及底盘等进行了简化处理。乘员舱内部保留了方向盘、座椅以及中控台,尽可能地还原乘员舱内部的几何信息,使得后续计算流体力学(CFD)仿真得到的热-流场更加接近真实情况。

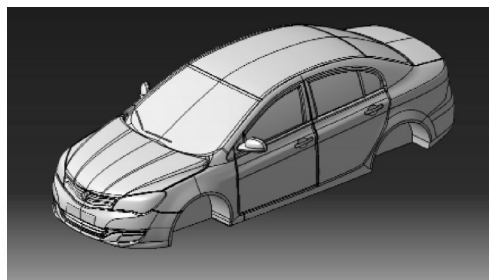


图1 整车车身几何模型

Fig.1 Geometric model of the whole vehicle body

几何清理以及面网格的生成是通过Hypermesh软件完成的。在原始几何模型的基础上,删去了发动机舱、后备箱以及车身外部细节等对乘员舱内部热-流场影响较小的部分,添加驾驶员模型至乘员舱模型中。将Hypermesh中生成的面网格导入STAR-CCM+中生成体网格,网格类型选用Trimmer网格加边界层网格,乘员舱体网格总数为351万,如图2所示。



图2 乘员舱体网格模型

Fig.2 Mesh model of passenger compartment

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。人体热调节模型选用Stolwijk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。

### 1.2 边界条件设置

边界条件按照实验所测进行设置,4个送风口设置为质量流量入口,质量流量分别为: $0.09$ 、 $0.04$ 、 $0.04$ 、 $0.08 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ ;送风温度为: $19^{\circ}\text{C}$ 、 $15^{\circ}\text{C}$ 、 $14^{\circ}\text{C}$ 、 $15^{\circ}\text{C}$ ,出风口为压力出口。壁面边界的热交换考虑热传导、对流以及辐射热传递,壁面热物性参数见表

1。太阳辐射强度为  $1\ 000\ \text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ,其中直射辐射为  $800\ \text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ,散射辐射为  $200\ \text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。实验时间在中午12时附近,太阳高度角设为  $90^\circ$ ,环境温度为  $33.8\ ^\circ\text{C}$ 。

表1 各壁面边界参数

Tab.1 Boundary parameters of each wall

车体壁面	厚度/cm	传热系数/( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ )	发射率	反射率	透射率
底盘	1.28	3.35	0.94	0.06	0
车门	0.20	5.04	0.90	0.10	0
车顶	0.17	5.61	0.74	0.26	0
车窗	0.53	10.49	0.40	0.10	0.5

### 1.3 人体热舒适性评价模型

人体热舒适性评价模型采用伯克利的热舒适性评价模型<sup>[10]</sup>,局部热感觉回归公式如下:

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

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(2)为局部热舒适的回归公式。

$$C_L = \left[ \frac{-4 - (C_6 + C_7|S_o|)}{|(-4 + C_3|S_o| + C_8)|^n} - \frac{-4 - (C_6 + C_7|S_o|)}{|(4 + C_3|S_o| + C_8)|^n} \right] \cdot \frac{e^{15(S_l + C_{3i}|S_o| + C_8)} + 1}{-4 - (C_6 + C_7|S_o|)} + \frac{-4 - (C_6 + C_7|S_o|)}{|(4 + C_3|S_o| + C_8)|^n} \quad (2)$$

式中: $|S_o|$ 为整体热感觉的绝对值; $C_3, C_6, C_7, C_8, n$ 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(3)为整体热感觉的回归公式。

$$S_o = \frac{\sum W_i S_l}{\sum W_i} \quad (3)$$

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。

## 2 结果与分析

### 2.1 CFD数值计算与实验结果对比

图3为实验现场照片。将乘员舱内热环境与人体热舒适性评价实验的结果与仿真结果进行对比。各测点的实验、仿真温度以及温度差值见表2。可以看出实验与仿真结果二者基本吻合,脚部空气温度误差为 $2^\circ\text{C}$ ,右下臂、右手以及左小腿的温度误差为 $2.5^\circ\text{C}$ 。这些部位的仿真温度均高于实验结果,原因是实验时受试者会主动去躲避较大的热刺激,使得身体处于一个较为舒适的状态。



图3 实验现场照片

Fig.3 Pictures of the experiment site

表2 实验与仿真结果温度对比

Tab.2 Temperature comparison of experiment and simulation results

测点	实验温度/ $^\circ\text{C}$	仿真温度/ $^\circ\text{C}$	温度差值/ $^\circ\text{C}$
呼吸点	28.8	28	-0.8
脚部空气	29.1	26.8	-2.3
仪表盘	55.6	59.1	3.5
前挡风玻璃	46.9	46.7	-0.2
内部车顶	28.9	27	-1.9
头部	33.4	31.3	-2.1
躯干	34.5	33.5	-1.0
左上臂	33.3	33.7	0.4
右上臂	33.3	34	0.7
左下臂	32.9	35	2.1
右下臂	32.3	34.4	2.1
左手	33.3	31.9	-1.4
右手	34.2	35.6	1.4
左大腿	34.9	34.3	-0.6
右大腿	34.3	34.9	0.6
左小腿	32.7	34.4	1.7
右小腿	32.8	34.9	2.1
左脚	34.6	32.6	-2.0
右脚	34.6	32.5	-2.1



## 2.2 乘员舱内驾驶员位置微环境及人体热舒适性

人体在低温气流作用下,皮肤通过周围的微环境进行热量的交换,本文根据温度边界层的概念确定人体周围的微环境。由CFD计算结果,在人体各部位作垂直于表面的线,从皮肤位置往外空气温度逐渐减低,直到与外围空气温度接近的点,该点与皮肤表面的距离即为该处的边界层厚度。本文进行数据处理时,分别在人体各部位作三条垂直线,根据三条线上的温度边界层厚度确定该人体部位对应的微环境。数据分析发现,人体各部位的边界层厚度略有不同,但各处边界层厚度均在1 cm左右。图4a为人的几何图,图4b则为人体周围所对应的微环境图。汽车乘员舱内空间狭小,使得其热-流场在空调送风以及外界热环境影响下速度梯度、温度梯度远大于建筑内热环境,人体身处在这种不均匀、不对称且梯度较大的热-流场中与周围热环境进行着热交换将直接影响着人体热舒适性。这种情况下,人体所处的热-流场并不能像均匀场中一样,用平均值或者某一点的值来代替身体各部位接触热环境的速度、温度以及平均辐射温度,所以采用图4所示的人体微环境的平均值来分析乘员舱内驾驶员位置的各部位热-流场分布以及人与微环境之间的相互作用。设定微环境距离人体皮肤表面1 cm,对应人体热调节模型的14个节段,微环境在人体各部位热边界层外也同样有14个区域,认为对应区域空气的平均性质与人体各部位进行热交换的空气性质相同,即对应区域上的面平均速度、平均温度为与该部位进行热交换的空气速度、温度。

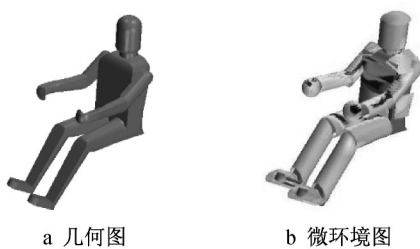


图4 人体微环境示意图

Fig.4 Schematic of human microenvironment

采用表3所示的11个工况来分析不同送风温度、送风速度、太阳辐射强度、太阳高度角、环境温度等5个因素对微环境及人体热舒适性的影响。

### 2.2.1 送风温度的影响

工况1、2、3的送风温度分别为13℃、10℃、16℃,送风速度均为5 m·s<sup>-1</sup>。从图5可以看出,送

表3 乘员舱内热-流场分析工况

Tab.3 Model computing conditions

工况	送风温度/℃	送风速度/(m·s <sup>-1</sup> )	太阳辐射强度/(W·m <sup>-2</sup> )	太阳高度角/(°)	环境温度/℃
1	13	5	800	60	35
2	10	5	800	60	35
3	16	5	800	60	35
4	13	3	800	60	35
5	13	7	800	60	35
6	13	5	600	60	35
7	13	5	1 000	60	35
8	13	5	800	40	35
9	13	5	800	80	35
10	13	5	800	60	32
11	13	5	800	60	38

风温度对驾驶员位置人体各节段周围速度几乎没有影响,但人体对称部位所处的微环境平均速度与温度并不相同,其中左手与右手位置平均速度相差约0.17 m·s<sup>-1</sup>,而下半身由于送风模式采用吹面模式,各部位周围速度差较小。对比不同送风温度下各部位微环境平均温度发现,与送风温度对乘员舱内整体热-流场的影响相同,各部位平均温度随着送风温度的升高而增大。受平均速度的影响,左手微环境的平均温度较低;而大腿部位由于太阳辐射以及较弱的送风影响,该部位微环境平均温度则较高。可见送风温度只会影响各部位微环境的空气平均温度,而对微环境的平均速度影响较小。不同送风温度下,人体各部位热感觉和热舒适主要受对应微环境温度的影响。

图6为不同送风温度下各部位局部及整体热感觉与热舒适指标的对比。从图中可以看出头部热感觉在各送风温度工况下均为负值,随着送风温度的上升,左上臂与左手的热感觉由偏冷转变成偏热,其他部位的热感觉均为正值。头部偏冷时热舒适处于较为舒适的状态,而脚部偏热时处于较为舒适的状态,这说明人体热舒适喜好头部偏冷而脚部偏热。工况1局部热舒适最差的部位为右手与右大腿;工况2局部热舒适最差的部位为左下臂与右大腿;工况3局部热舒适最差的部位为右手与右小腿。可以看出这三个工况下,热舒适较差的部位为右手与右腿,这是因为驾驶员位置的右手与右腿区域受到的太阳辐射强度要大于另一侧,另外送风口1出风对身体左半部分的影响要大于送风口2对身体右半部分的影响。随着送风温度的升高,整体热感觉从1.1上升至1.66,说明驾驶员感觉到更热;

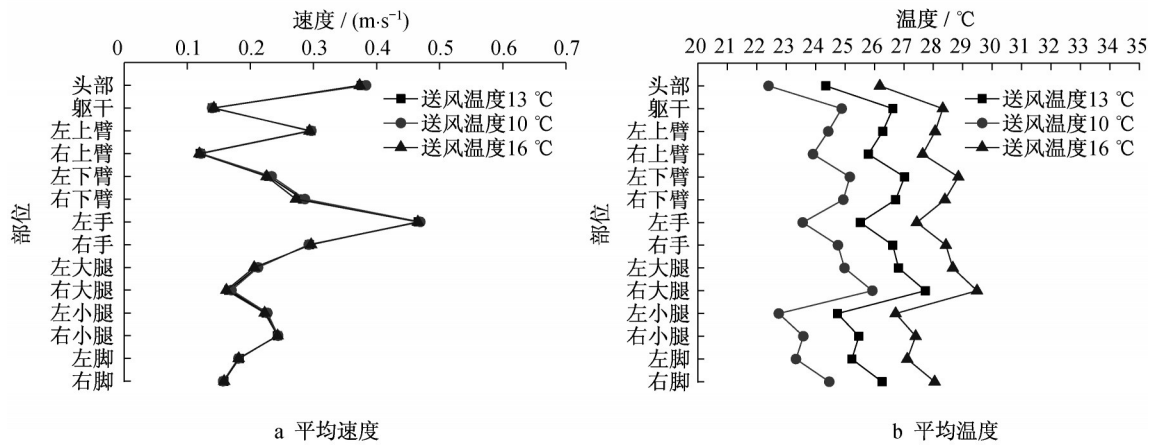


图5 不同送风温度下各部位微环境平均速度、温度

Fig.5 Average velocity and temperature of microenvironment at different air supply temperatures

而整体热舒适从-0.97变为-1.46,人体变得更不舒适。夏季在整体热感觉偏热的情况下,人更加喜

好较低的送风温度,能够降低热感觉,改善热舒适。

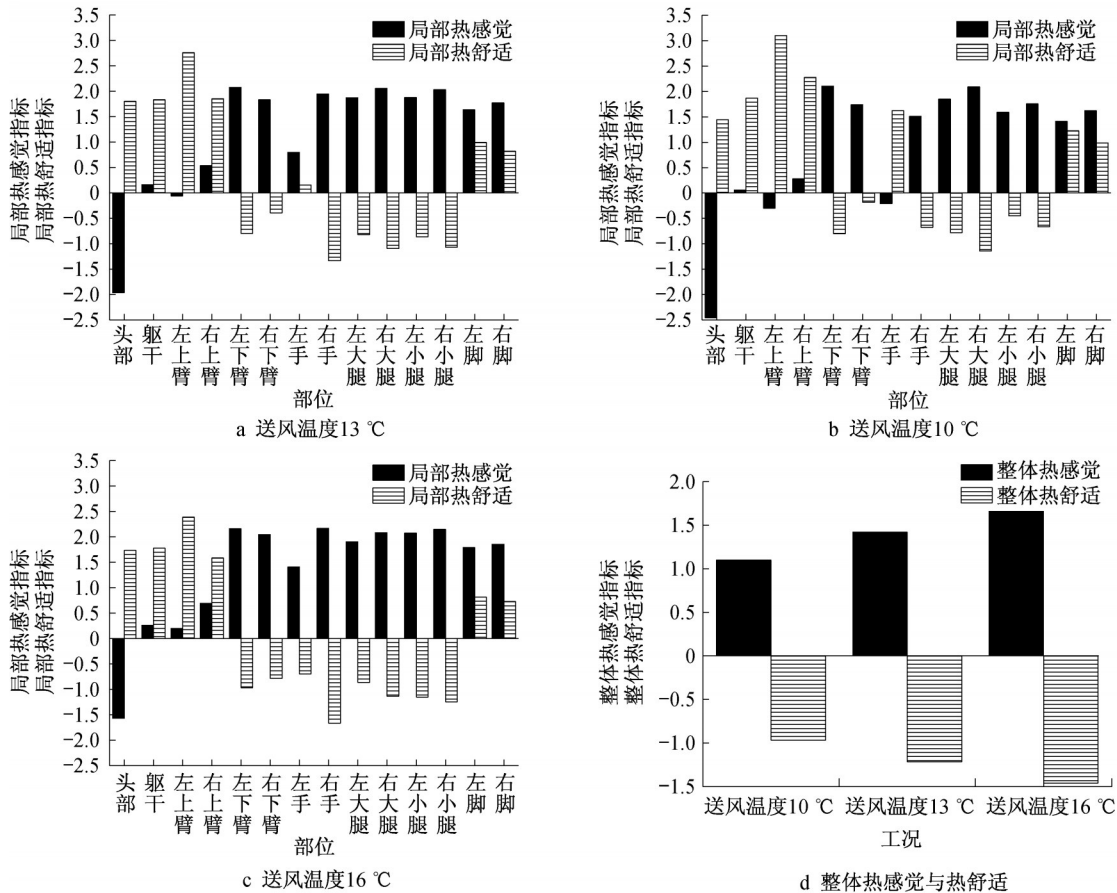


图6 不同送风温度下局部及整体热感觉与热舒适

Fig.6 Local and overall thermal sensation and thermal comfort at different air supply temperatures

### 2.2.2 送风速度的影响

图7为送风速度分别为5、3、7 m·s<sup>-1</sup>,送风温度为13°C时,乘员舱内整体速度场与温度场均受空调送风速度的影响。从图7可以看出各部位微环境的平均速度与送风速度呈正相关,而平均温度与

送风速度呈负相关,但各部位微环境的平均速度并没有随着送风速度的增大而均匀增大。观察图7a发现工况1与工况4下头部和躯干微环境的平均速度相差不大,而工况5下该区域的平均速度明显增大,说明送风速度较小时,并不能对头部以及

躯干的微环境平均速度造成影响,这也表明乘员舱内的平均速度与各部位所处微环境有差别。而人体各部位微环境的平均温度随着空调送风速度的增大而降低,送风速度的增大使得人体微环境平均速度增大,平均温度降低可影响其热感觉与热舒适。

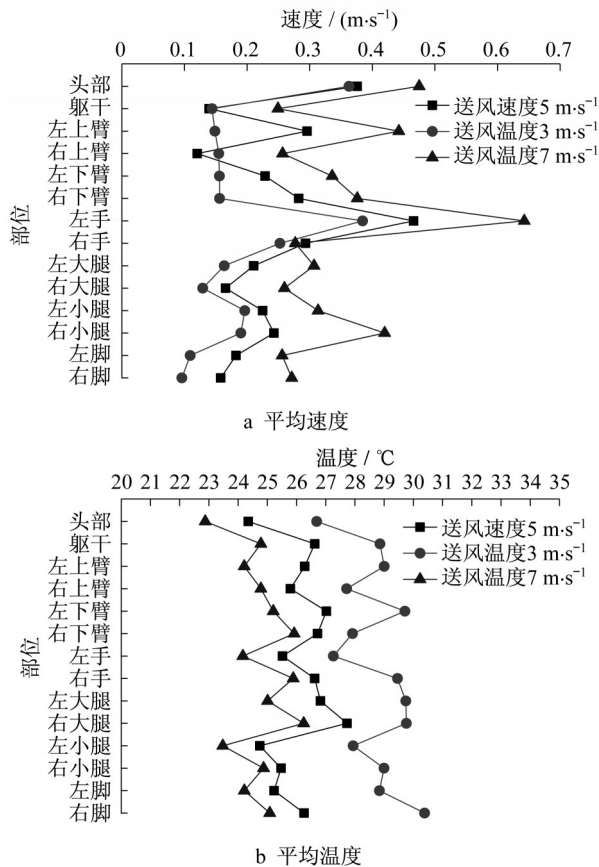


图7 不同送风速度下各部位微环境平均速度、温度  
Fig.7 Average velocity and temperature of microenvironment at different air supply velocities

从图8可以看出,将工况4与工况5下的人体各部位局部热感觉与热舒适与工况1进行对比,发现头部区域的热感觉均为负值,随着送风速度的增大,躯干、左上臂、右上臂以及左手的热感觉从偏热转为了偏冷,这些部位受到空调送风的影响较大,其中左手部位的热舒适在空调送风的作用下变化较为明显。工况4局部热舒适最差的部位为右手与右小腿;工况5局部热舒适最差的部位为右大腿与头部。通过对比工况4、1、5下的右手局部热舒适,其数值为-1.986、-1.337、-0.2433,表明虽然送风对右手影响较弱,但风速的提高能够改善右手的局部热舒适,其对整体热舒适的提升有一定的作用。而腿部区域受送风影响较弱且受

到太阳辐射的作用,使右腿成为热舒适较差的部位。头部区域由于增大的风速,使其皮肤表面温度降低,另外较大的吹面风速给人带来不舒适的吹风感使得热舒适变差。整体热感觉随着送风速度的增大从1.88降至0.47,整体热舒适从-1.76变为-0.7,风速增大使得热舒适较为改善,表明在整体偏热的情况下,人体更倾向于较大的风速,使其感受到更为舒适。

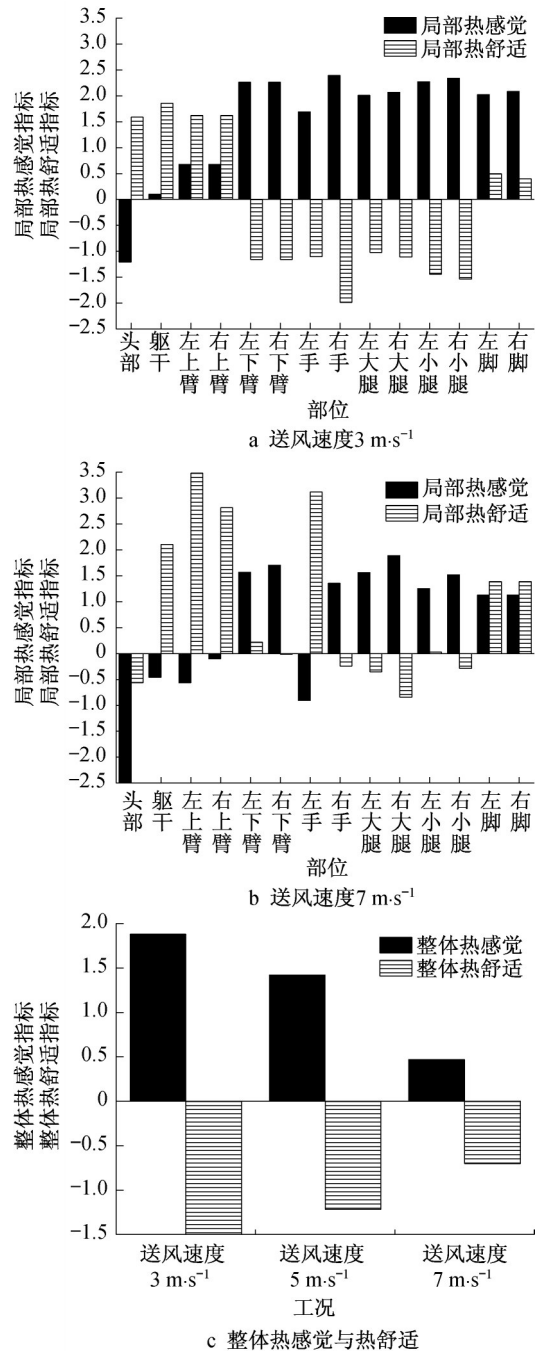


图8 不同送风速度下局部及整体热感觉与热舒适  
Fig.8 Local and overall thermal sensation and thermal comfort at different air supply velocities



### 2.2.3 太阳辐射强度的影响

图9中,工况1、6、7的太阳辐射强度分别为800、600、1 000  $W \cdot m^{-2}$ ,太阳辐射强度为外界环境条件中最为影响微环境平均温度的因素。

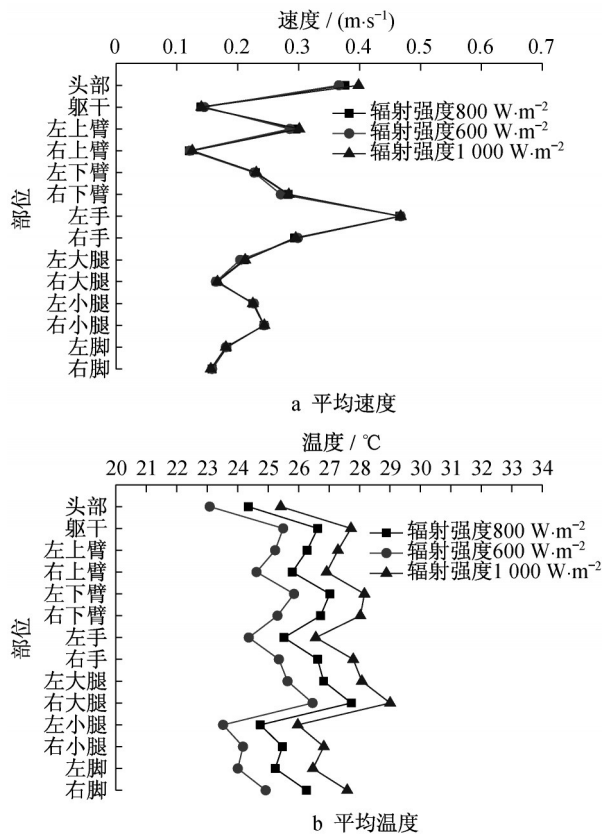


图9 不同太阳辐射强度下各部位微环境平均速度、温度  
Fig.9 Average velocity and temperature of microenvironment at different solar radiation intensities

从图10可以看出,不同太阳辐射强度下热感觉与热舒适变化最大为左手,局部热感觉从-0.546增长为1.688,而热舒适从2.169降低至-1.085。工况6局部热舒适最差的部位为右大腿与右小腿;工况7局部热舒适最差的部位为右手与右小腿。可以看出当太阳辐射强大变大时,手部的局部热舒适由较为舒适转变成最不舒适,其局部热舒适变化要远大于其他部位,这也说明其受到太阳辐射的影响较大。太阳辐射强度的增大使整体热感觉从0.92增大至1.79,而整体热舒适由-0.8降低为-1.67,太阳辐射强度的增长会使得乘员舱内人体各部位的辐射及蒸发散热量增加,对局部热感觉与热舒适的影响较为明显。

### 2.2.4 太阳高度角的影响

从图11中工况1、8、9的太阳高度角分别为

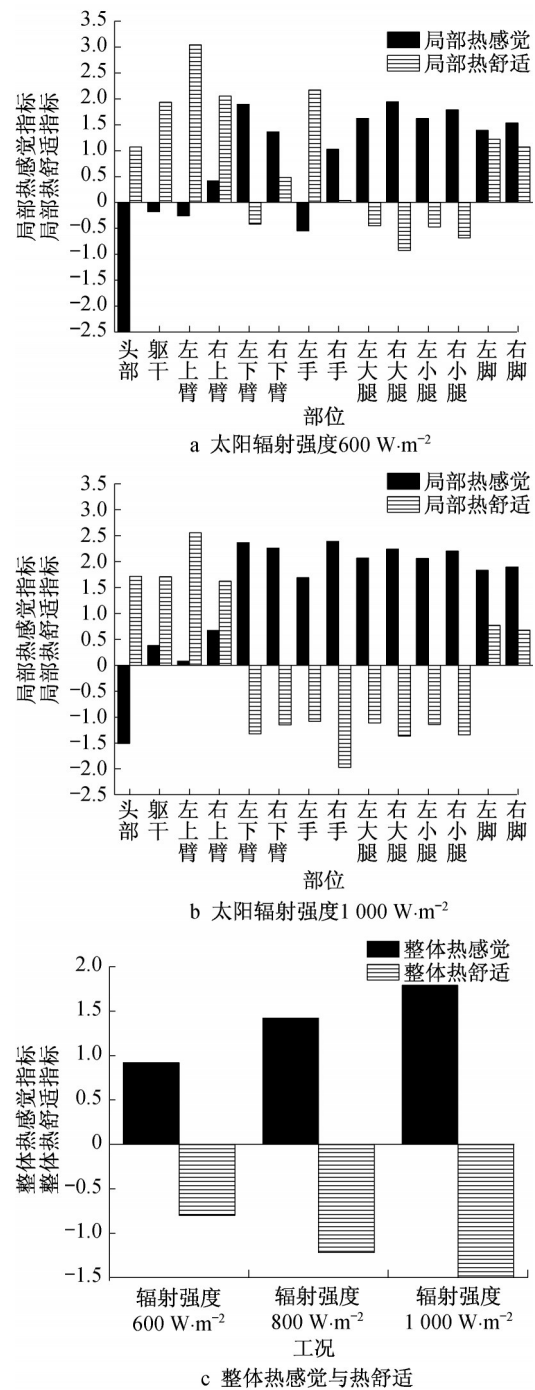


图10 不同太阳辐射强度下局部及整体热感觉与热舒适  
Fig.10 Local and overall thermal sensation and thermal comfort at different solar radiation intensities

60°、40°、80°,可以看出太阳高度角的不同使得太阳辐射透过挡风玻璃作用在人体不同的部位之上,太阳辐射作用的部位平均辐射温度较高。当太阳高度角为40°时,入射角度较低,太阳辐射作用在人体躯干较高位置以及上臂处;当太阳高度角增大至80°时,入射角较大,太阳辐射作用位置偏低为大

腿、小腿以及手部区域。

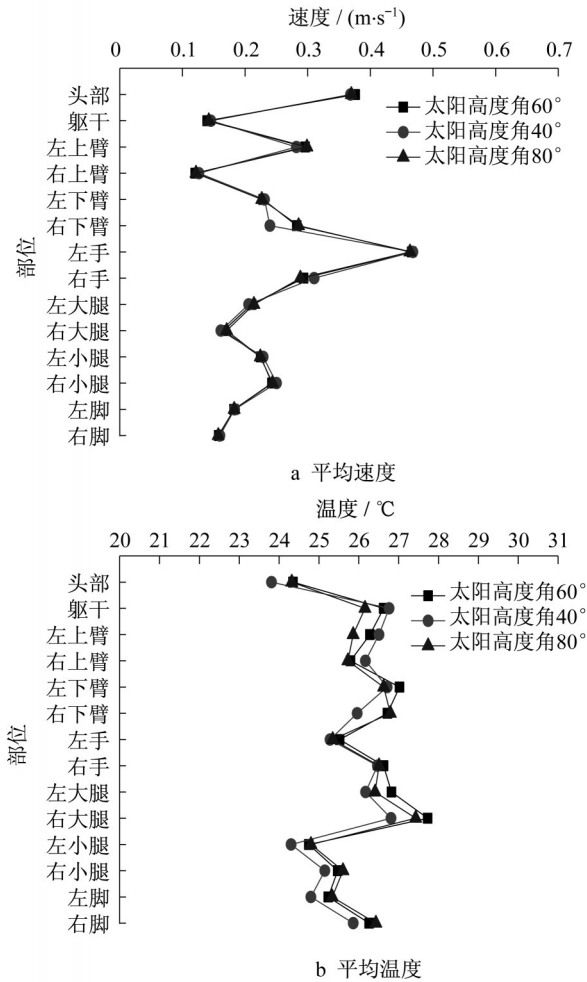


图11 不同太阳高度角下各部位微环境平均速度、温度  
Fig.11 Average velocity and temperature of micro-environment at different solar height angles

通过图12不同太阳高度角下人体各部位的局部热感觉与热舒适图可以观察到,受到太阳辐射作用的部位皮肤温度升高后局部热感觉与热舒适的变化。当太阳高度角为40°时,受到太阳辐射作用的躯干及上臂的皮肤温度要大于太阳高度角80°的情况,这使得太阳高度角为40°时该部位的热感觉要大于80°时的,热舒适则变小。而当太阳高度角为60°时,受太阳辐射的作用使得左右大腿的热感觉增大,热舒适值降低。不同太阳高度角下整体热感觉与热舒适方面,工况1即太阳高度角为60°时人体的整体热感觉最热,但整体热舒适最差的为太阳高度角为80°的工况9。造成这个现象的原因是太阳高度角为80°时,驾驶员小腿位置受到较强的太阳辐射,且该部位较其他高度角时太阳辐射直射部位更易感到不舒适。

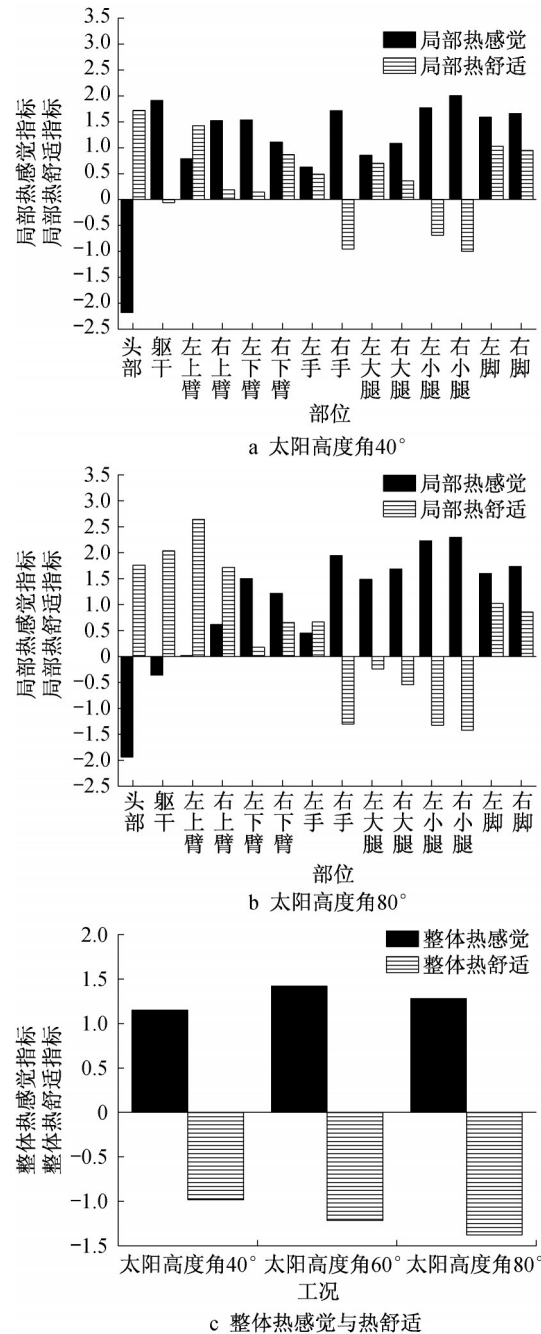


图12 不同太阳高度角下局部及整体热感觉与热舒适  
Fig.12 Thermal sensation and thermal comfort at different solar height angles

2.2.5 环境温度的影响

图13,图14中中工况1、10、11的环境温度分别为35℃、32℃、38℃。通过观察可以发现,环境温度升高对人体各部位微环境的影响并不明显。造成这一现象的原因是环境温度的变化仅能影响壁面及近壁面区的空气的温度,而人体所在的区域热-流场主要受空调送风的影响,且壁面及近壁面区空气的温度对人体热舒适影响较小。整体热感



觉随着环境温度的升高而变热,热舒适反之,但变化幅度较小。

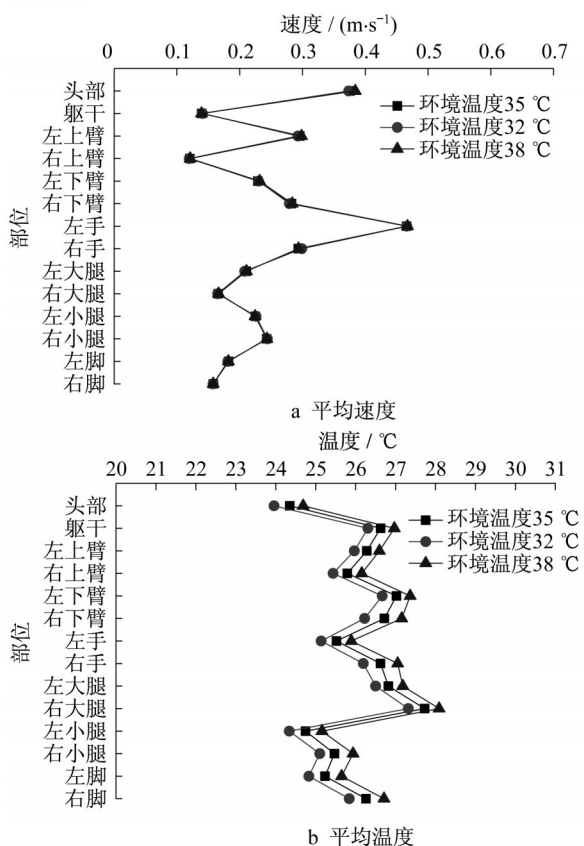


图13 不同环境温度下各部位微环境平均速度、温度  
Fig.13 Average velocity and temperature of micro-environment at different environmental temperatures

### 3 结论

(1)乘员舱内驾驶员位置左右对称部位所处的微环境并不相同,其中左右手处微环境的平均速度和温度差值最大。由于车内送风模式采用吹面模式,上身区域左右对称部位微环境的差距要大于下腿部区域。除送风速度外,其他影响因素对微环境平均速度影响较小。而平均温度方面,每增大3°C的送风温度,微环境的平均温度上升1.8°C;每增大200 W·m<sup>2</sup>的太阳辐射强度,微环境的平均温度上升1.2°C;外界环境每上升3°C使得微环境的平均温度升高0.38°C。

(2)空调送风温度从10°C升至16°C,人体整体热感觉则从1.1升至1.66,整体热舒适从-0.97降为-1.46;送风速度从3 m·s<sup>-1</sup>增大至7 m·s<sup>-1</sup>,人体整体热感觉由1.88降至0.47,整体热舒适从-1.76变

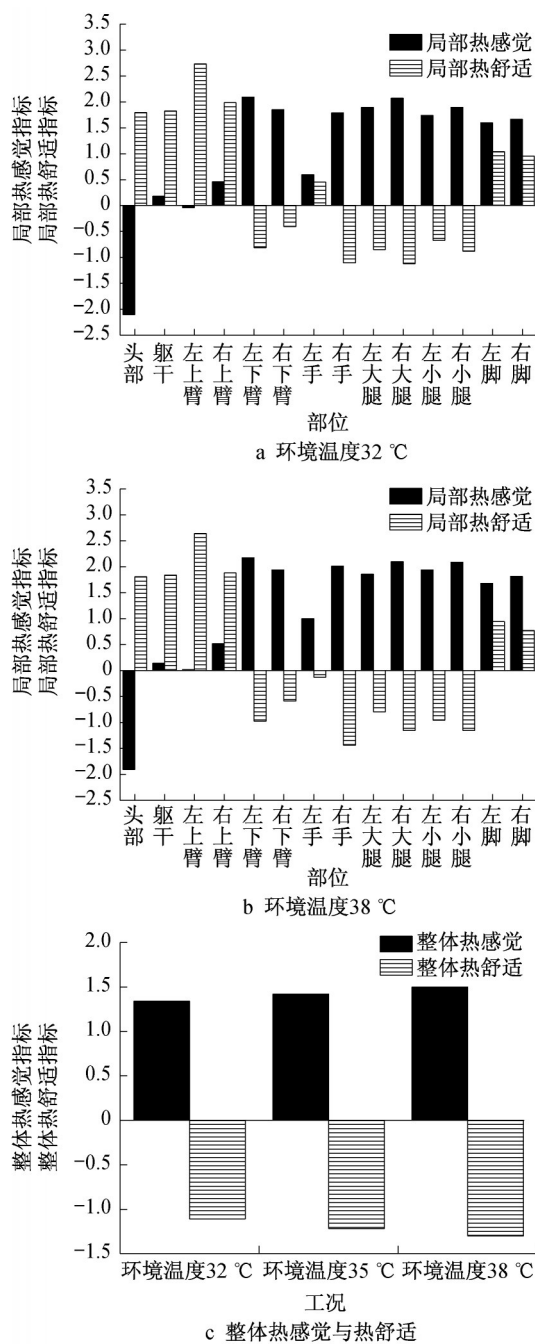


图14 不同环境温度下局部及整体热感觉与热舒适  
Fig.14 Local and overall thermal sensation and thermal comfort at different environmental temperatures

为-0.7。说明夏季在整体热感觉偏热的情况下,人更加喜好较低的送风温度与较高的送风速度,能够使乘员舱内的驾乘人员感到更舒适。

(3)太阳辐射强度是外界环境条件中最为影响乘员舱内人体热舒适的因素,受到太阳辐射的作用使得人体各部位皮肤表面温度升高,太阳辐射强度从600 W·m<sup>-2</sup>增长至1000 W·m<sup>-2</sup>使得人体整体热感

觉从0.92增大至1.79,而整体热舒适由-0.8降低为-1.67,整体热感觉变热,热舒适变差;太阳高度角的变化会使得太阳辐射作用在不同的部位上,对整体热感觉与热舒适并没有呈现线性的作用;而环境温度对人体热感觉与热舒适的影响较小。

#### 参考文献:

- [1] ROY D, PETITJEAN P, CLODIC D. Influence of various heat transfers on passenger thermal comfort [C/CD]//[S.I.]: SAE World Congress, 2003.2003-01-1075.
- [2] HODDER S G, PARSONS K. The effects of solar radiation on thermal comfort [J]. *International Journal of Biometeorology*, 2006, 51(3): 233.
- [3] 倪冬香. 基于人体热调节模型的轿车乘员舱热舒适性分析[D]. 上海: 上海交通大学, 2010.  
NI Dongxiang. Thermal comfort study in automobile passenger compartment based on human thermoregulation model [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2010.
- [4] 申红丽. 汽车乘员舱热舒适性分析及优化[D]. 长沙: 湖南大学, 2013.  
SHEN Hongli. Analysis and optimization on passenger compartment thermal comfort [D]. Changsha: Hunan University, 2013.
- [5] 黄木生. 基于CFD的微型车乘员舱乘员热舒适度分析[D]. 长沙: 湖南大学, 2013.  
HUANG Musheng. Thermal comfort analysis of microbus passenger compartment based on CFD [D]. Changsha: Hunan University, 2013.
- [6] MYOUNG S O, JAE H A, DONG W K, *et al.* Thermal comfort and energy saving in a vehicle compartment using a localized air-conditioning system [J]. *Applied Energy*, 2014, 133: 14.
- [7] 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(8):951.  
ZHANG Bingli, XUE Tielong, HU Zhongwen. Analysis and improvement of the thermal comfort in the passenger compartment of a car based on PMV/PPD and air age [J]. *Automotive Engineering*, 2015(8):951.
- [8] MOON J H, LEE J W, JEONG C H, *et al.* Thermal comfort analysis in a passenger compartment considering the solar radiation effect [J]. *International Journal of Thermal Sciences*. 2016, 107: 77.
- [9] DANCA P, BODE F, NASTASE I, *et al.* On the possibility of CFD modeling of the indoor environment in a vehicle [J]. *Energy Procedia*. 2017, 112: 656.
- [10] 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.