

基于等效均匀温度的车内热环境分析

杨志刚^{1,2}, 林赵敏¹, 赵兰萍³

(1. 同济大学 上海市地面交通工具空气动力学与热环境模拟重点实验室, 上海 201804; 2. 北京民用飞机技术研究中心, 北京 102211;
3. 同济大学 机械与能源工程学院, 上海 201804)

摘要: 通过计算流体力学(CFD)与人体热调节模型的耦合仿真, 得到人体整体和各节段的等效均匀温度(EHT). 对比空调送风速度、送风温度与太阳辐射强度对整体 EHT、平均皮肤温度及各换热损失量的影响, 得到各因素变化时所处的 EHT 舒适区, 采用试验设计法和方差分析法, 得到 3 个影响因素对整体 EHT、各节段 EHT、平均皮肤温度及干热损失量的贡献率, 发现送风条件影响大于太阳辐射, 其中送风温度的影响最显著. 在此基础上, 得到 EHT 的拟合方程, 并提出基于拟合方程改进空调控制的新思路.

关键词: 车内热环境; 等效均匀温度; 送风速度; 送风温度; 太阳辐射强度

中图分类号: U462.3

文献标志码: A

Analysis of Thermal Environment in Vehicle Based on Equivalent Homogenous Temperature

YANG Zhigang^{1,2}, LIN Zhaomin¹, ZHAO Lanping³

(1. Shanghai Key Lab of Vehicle Aerodynamics and Vehicle Thermal Management Systems, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Beijing Aeronautical Science and Technology Research Institute, Beijing 102211, China; 3. School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: The EHT (equivalent homogenous temperature) was calculated by using the coupling model of CFD and human thermoregulation model. The effects of air conditioning velocity, temperature, and solar radiation on overall EHT, mean skin temperature, and dry heat loss were compared, and the contribution ratio of the these factors were calculated. The results show that the influence of air conditioning is greater than that of solar radiation, in which the influence of the supply air temperature is most significant. Finally the fitting equation of the three factors and EHT were obtained, and a new idea to improve air conditioning controlling based on the fitting equation was proposed.

Key words: thermal environment in vehicle; equivalent homogenous temperature; inlet air velocity; inlet air temperature; solar radiation

热舒适性是汽车舒适性的一个重要方面, 并与空调能耗紧密相关, 近年来受到越来越多的关注. 在车内热环境中, 人体各节段所处的微环境差异较大, 人与环境之间的热交换情况复杂. Nillson^[1]指出, 人体并不能区分热交换的方式, 只对各种形式的热交换结果即热损失量产生热感觉. Wyon 等^[2]则指出, 人体总热损失影响人的精神状态与工作效率, 而局部热损失决定了人体热舒适度, 同时影响局部吹风感, 局部过冷甚至会导致肌肉损伤. 因此, 热舒适研究中, 人体整体与各节段热损失量至关重要, 而整合皮肤温度与热损失的热舒适客观指标 EHT (equivalent homogenous temperature, 等效均匀温度) 是一个能够代表人与热环境各热交换作用结果的综合参数.

为得到 EHT 数值, 传统方法是根据定义, 通过热损失、皮肤温度及传热系数计算整体与各节段 EHT, 但该方法依赖于暖体假人的车内实验, 无法在开发前期评价车内热环境或用于空调控制策略设计.

以往学者的研究^[3-5]多聚焦于空调送风条件与太阳辐射对车内热环境温度与人体皮肤温度的影响, 并未得到其对人体舒适性的影响.

文章通过基于 CFD (computational fluid dynamics, 计算流体力学) 与人体热调节模型的耦合仿真, 以空调送风速度、送风温度及太阳辐射强度作为分析因素, 设计 3 水平全因子矩阵, 计算得到 EHT, 对比分析空调送风速度、送风温度与太阳辐射

收稿日期: 2019-03-16

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, 主要研究方向为空气动力学. E-mail: zhigangyang@tongji.edu.cn

通信作者: 赵兰萍(1967—), 女, 副教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为高效换热技术、整车热管理.

E-mail: lanpingzhao@tongji.edu.cn

强度对整体与局部 EHT、平均皮肤温度及换热损失量的影响,并得到以此三者作为参数预测整体与局部 EHT 的拟合方程,为研究汽车热舒适条件提供参考,有助于基于 EHT 的空调控制策略开发。

1 CFD 验证

1.1 仿真方法

乘员舱几何模型由试验用车三维扫描后通过软件 CATIA 逆向建模并简化得到,之后在驾驶员位置加入人体几何模型,使用软件 Hypermesh 生成面网格,在软件 STAR-CCM+ 中使用 Trimmed Mesher 生成体网格,加 Prism Layer Mesher 生成边界层网格,如图 1 所示,体网格数量为 400 万。车内气流计算采用 Boussinesq 假设,以 Realizable $k-\epsilon$ 湍流模型,结合 2 阶迎风格式完成数值计算。为较为精确地模拟太阳辐射对车内热环境的影响辐射,计算采用区分长短波段的 S2S(surface-to-surface)辐射模型。

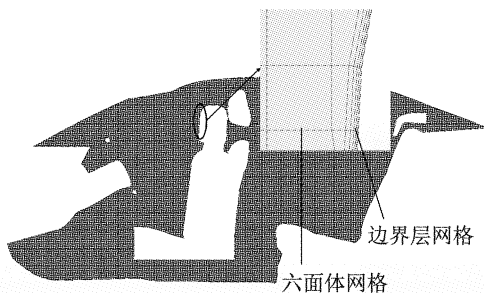


图 1 CFD 网格模型

Fig.1 CFD grid model

验证试验以荣威 350 为试验用车,试验地点在同济大学试车场,场地内太阳辐射不受建筑物遮挡。试验时间为 2018 年 7 月中旬,环境空气温度为 34~36 °C,为排除人体个体差异的影响进行了 3 组单人的驾驶员位置试验。试验中空调温度档设置为最低温档,风速档位设置为最高风速档,4 个出风口均固定在吹面模式下运行。试验中测量车内热环境温度与人体 14 节段皮肤温度。环境温度测点如图 2 所示,包括 4 个出风口温度、仪表板温度、前挡风玻璃温度、车内顶部温度、呼吸点温度、脚部周围空气温度和车外环境温度。人体皮肤温度测点包括头部、胸部、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 14 个节段的皮肤温度。试验时车辆与太阳的相对位置如图 3 所示,在试验过程中用太阳辐射仪测量外部车顶及内部仪表板太阳辐射强度。

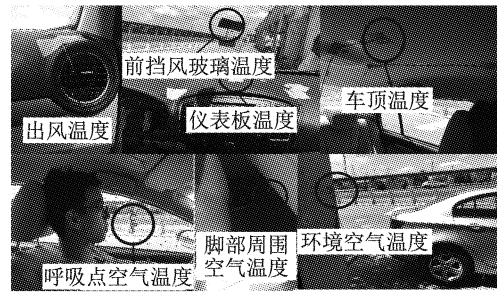


图 2 环境温度测点

Fig.2 Monitoring points of ambient temperature

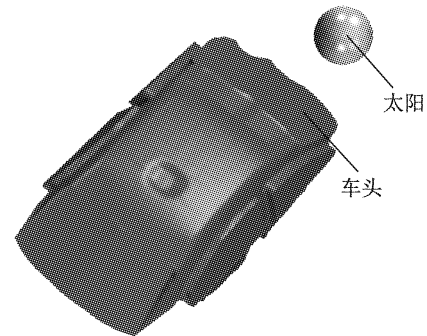


图 3 车与太阳的相对位置

Fig.3 Relative position of car and sun

以该单人驾驶员位置的车内热环境试验为基础,仿真计算边界条件使用试验测得的数据,包括空调送风速度与送风温度、车外空气温度、相对湿度,太阳辐射强度及太阳高度与方位角,3 组试验所测得的数据如表 1 所示。其中 4 个出风口的位置如图 4 所示。在仿真中,设置模型入口为质量流量入口,根据出风口面积与出风速度计算得到,出口设置为压力出口。内壁面设置为耦合边界条件,相关的汽车物理性能设置参数如表 2 所示。

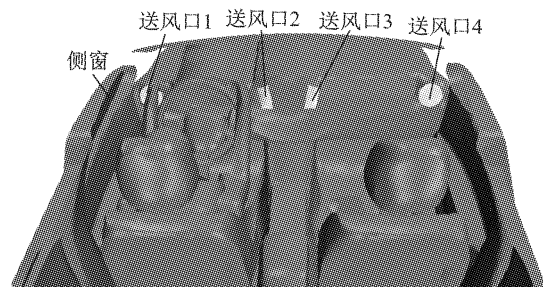


图 4 出风口与车窗位置

Fig.4 Positions of air outlets and windows

人体热调节计算使用 Stolwijk 等^[6]提出的人体生理热调节模型,将人体分为 14 个节段,分节段示意图如图 5 所示,每个节段又分为皮肤、脂肪、肌肉与核心 4 层。该模型将人体热调节系统分为被动系统与主动系统。被动系统计算人体与热环境间的对流、辐射、传导热交换量,主动系统通过调节散热与

表 1 仿真计算边界条件

Tab.1 Boundary conditions of simulation

组别	送风口	送风温度/℃	送风速度/(m·s ⁻¹)	车外空气温度/℃	相对湿度/%	太阳直射辐射强度/(W·m ⁻²)	太阳散射辐射强度/(W·m ⁻²)	太阳方位角/(°)	太阳高度角/(°)
1	1	19.0	9.2	33.8	60	800	200	253	75
	2	15.0	6.7						
	3	14.0	6.5						
	4	15.0	8.5						
2	1	15.5	9.2	33.4	60	800	200	253	75
	2	12.1	6.7						
	3	11.3	6.5						
	4	12.2	8.5						
3	1	16.2	9.2	32.7	60	800	200	253	75
	2	12.7	6.7						
	3	11.7	6.5						
	4	12.9	8.5						

表 2 相关物理性能设置参数

Tab.2 Parameters of related settings

位置	厚度/m	导热系数/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	热绝缘系数/(m ² ·K·W ⁻¹)	传热系数/(W·m ⁻² ·K ⁻¹)	短波辐射率	长波辐射率	短波透射率	长波透射率
底盘	0.029 4	0.041 50	0.708 3	3.35	0.80	0.8	0	0
门	0.111 1	0.028 74	3.866 1	5.04	0.80	0.8	0	0
防火墙	0.040 0	0.033 94	1.178 5	5.61	0	0.8	0	0
仪表台	0.033 7	0.033 94	1.178 5	5.61	0.80	0.8	0	0
车顶	0.063 8	0.029 64	2.152 0	5.61	0.80	0.8	0	0
座椅	0.041 0	0.033 43	1.178 5	3.35	0.80	0.8	0	0
前挡风	0.005 1	0.591 50	0.004 4	10.49	0.40	0.8	0.52	0
侧窗与后窗	0.004 0	0.900 00	0.004 4	10.68	0.39	0.8	0.55	0

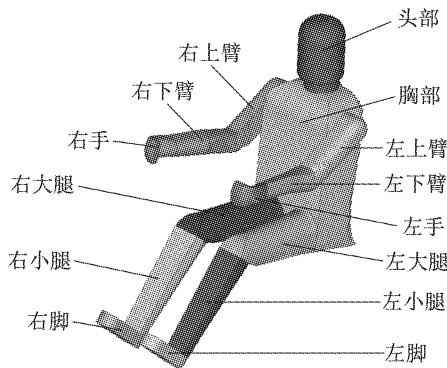


图 5 Stolwijk 模型人体节段分段示意图^[6]

Fig.5 Human segmentation of Stolwijk's model^[6]

产热维持人体热平衡. 该模型能较好地模拟非均匀热环境下的人体皮肤温度值.

1.2 模型验证

计算收敛时, 车内温度场如图 6 所示, 可见车内热环境的不均匀性显著.

图 7 为试验与仿真人体各个部位的皮肤温度值. 图 8 为试验与仿真的壁面与空气测点温度值. 通过 3 组试验与仿真的对比发现, CFD 计算结果误差均在 10% 以内, 可认为 CFD 仿真能较好地模拟车内热环境与人体热调节.

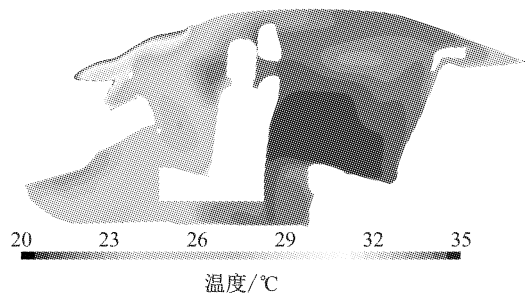


图 6 车内温度场

Fig.6 Temperature field inside the car

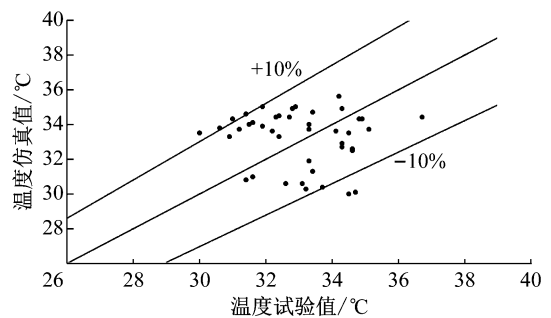


图 7 试验与仿真皮肤温度

Fig.7 Skin temperature of experiment and simulation

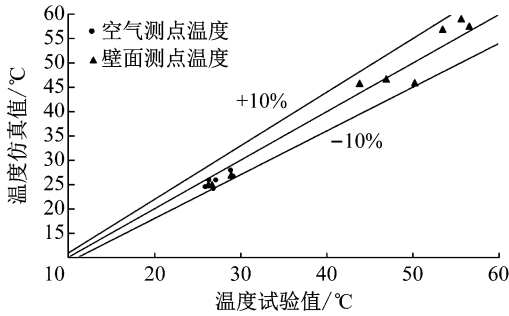


图 8 试验与仿真壁面与空气测点温度

Fig.8 Wall and air temperature of experiment and simulation

2 EHT 及 EHT 舒适区

2.1 EHT 的概念

EHT 是 Wyon^[7]使用暖体假人评价车内热环境时提出的人体热舒适评价指标,其定义是:设定一个理想等效均匀环境,空气流速为 0,空气温度等于平均辐射温度,在衣着量和代谢强度相同的情况下,如果非均匀环境下身体某一部位的干热损失与其在该均匀环境下的干热损失相等,就称均匀环境下的空气温度为非均匀环境下该部位的 EHT.该定义中的干热损失后被 Han 等^[8]通过下式来表示:

$$C + R + Q_{sun} = C_{EHT} + R_{EHT} \quad (1)$$

式中: C 为实际对流换热损失; R 为实际壁面辐射换热损失; Q_{sun} 为太阳辐射造成的换热损失; C_{EHT} 为等效环境下的对流换热损失; R_{EHT} 为等效环境下的辐射换热损失.

可以看出,实际环境下的干热损失总量等于等效无风环境下的干热损失总和.

EHT 综合了风速、风温、壁面温度、太阳辐射及人体与固体接触面导热等众多环境参数的影响,物理意义清晰,使用单一的量描述热交换的综合作用结果,容易解释也便于理解^[9]. EHT 的值较大则热损失较少,人体将具有较热的热感觉;反之, EHT 的值越小则干热损失越大,人体将具有较冷的热感觉.此外,还可以得到各节段的局部 EHT,对研究车内热环境这种非均匀热条件下的人体热舒适性十分适当、有效.

2.2 EHT 计算

EHT 根据 ISO 14505-2—2006^[10]中的标准公式计算,计算公式如下:

$$t_{eq} = t_s - Q/h_{cal} \quad (2)$$

式中: t_{eq} 为等效均匀温度 EHT, °C; t_s 为皮肤温度, °C; Q 为干热损失,包括对流传热及辐射传热量,

$W \cdot m^{-2}$; h_{cal} 为理想等效均匀热环境下相同坐姿及服装的人体表面综合换热系数, $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$, 人体各局部 h_{cal} 如表 3 所示,取值来自文献^[11].

表 3 h_{cal} 取值^[11]

Tab.3 Value of h_{cal} ^[11]

部位	h_{cal}	部位	h_{cal}
头部	7.9	左大腿	3.0
胸部	3.5	右大腿	2.9
左上臂	7.0	左小腿	5.9
右上臂	7.3	右小腿	5.5
左下臂	6.6	左脚	6.0
右下臂	6.4	右脚	6.0
左手	8.6	整体	5.2
右手	9.0		

整体 EHT 基于平均皮肤温度与整体总干热损失计算得来,其中平均皮肤温度根据局部皮肤温度进行面积平均计算,计算公式如下:

$$t_{s,mean} = \sum (t_{s,i}A_i) / \sum A_i \quad (3)$$

式中: $t_{s,mean}$ 为平均皮肤温度; $t_{s,i}$ 为各节段皮肤温度; A_i 为各节段面积.

2.3 EHT 舒适区

人体对热环境有一定的适应范围, Wyon^[7]根据试验得出 EHT 舒适区, Nilsson^[1]则根据服装热阻的不同做了进一步改进.以 Nilsson 所得舒适区为参考,根据本研究的参数条件与人体节段,得到如图 9 所示的人体 14 个节段与整体 EHT 舒适范围,当计算所得的各节段或整体 EHT 值位于各区域内,即得到不同的舒适程度.

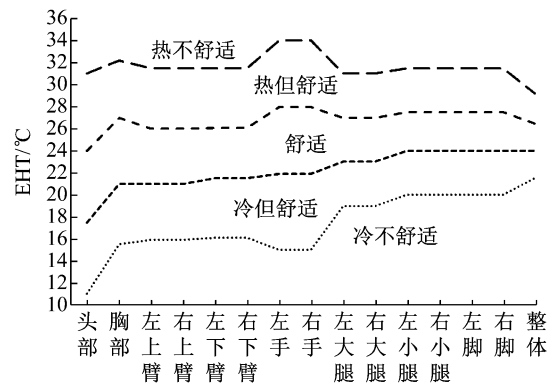


图 9 EHT 热舒适区

Fig.9 EHT thermal comfort zone

3 空调送风与太阳辐射强度对 EHT 的影响分析

3.1 影响因素设置

为了比较空调送风条件(即送风速度、送风温

度)与太阳辐射对 EHT 的影响,进行 DOE (design of experiment, 试验设计) 全因子设计分析。DOE 是一种通过建立数学模型($y=f(x_i)$)来确定一个或多个输出响应 y 与输入因子 x_i 之间关系的方法。使用 DOE 方法系统地改变输入因子,应用统计学原理和方法,分析确定它们对输出响应的影响,以此能够确定输入因子对输出响应的影响程度,识别输入因子设置以实现优化的输出响应,此外还能够阐明输入因子之间的相互作用关系。

空调送风速度、送风温度及太阳辐射强度为设计因素,耦合仿真得到的人体 14 个节段皮肤温度、平局皮肤温度与对应的干热损失量,其中各节段皮肤温度及干热损失量可在人体热调节模型输出文件中直接读取,根据式(2)计算人体各节段及整体 EHT 作为响应量,进行 DOE 全因子水平设计,如表 4 所示,据此得到 3^3 组因素组合。除 3 个设计因素的变化外,仿真模型及边界条件设置均与仿真验证中的设置相同。

表 4 设计因素水平表

Tab.4 Level of design factors

送风速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	送风温度/ $^{\circ}\text{C}$	太阳辐射强度/ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)
5	6	600
7	10	800
9	14	1 000

3.2 各因素对 EHT 的影响

首先进行单因素分析。为了分析单因素与响应间的变化规律,在全因子试验设计组上添加中间点,共 6 组计算工况。分析送风速度时,送风温度固定为 10°C ,太阳辐射固定为 $800 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,送风速度在 $5 \sim 9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 间变化;分析送风温度时,送风速度固定为 $7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,太阳辐射强度固定为 $800 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,送风温度在 $6 \sim 14^{\circ}\text{C}$ 间变化;分析太阳辐射时,送风速度固定为 $7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,送风温度固定为 10°C ,太阳辐射强度在 $600 \sim 1\ 000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 间变化,以此观察各个因素与 EHT 的关系。

图 10 为 3 个因素与整体 EHT 的关系。从图中可以看出,送风速度变大时,整体 EHT 逐渐变小;而送风温度变大时整体 EHT 线性增大。当太阳辐射强度从 $600 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 增大到 $700 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 及从 $900 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 增大到 $1\ 000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 时,EHT 的变化较大,而太阳辐射在 $700 \sim 900 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 范围内对整体 EHT 几乎没有影响。

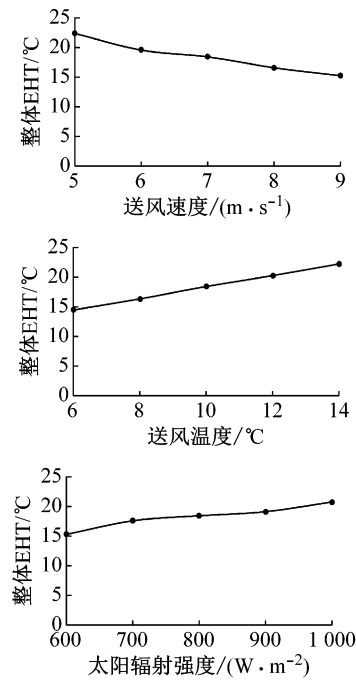


图 10 送风速度、送风温度及太阳辐射对整体 EHT 的影响
Fig.10 Effect of supply air velocity, temperature, and solar radiation on overall EHT

进一步分析这 3 个因素对平均皮肤温度及对流、辐射、蒸发热损失的影响,分别如图 11、图 12 所示。从图 11 中可以看出,送风速度与送风温度对平均皮肤温度的影响都比较大,风速增大,平均皮肤温度下降,送风温度升高平均皮肤温度也跟着升高;而

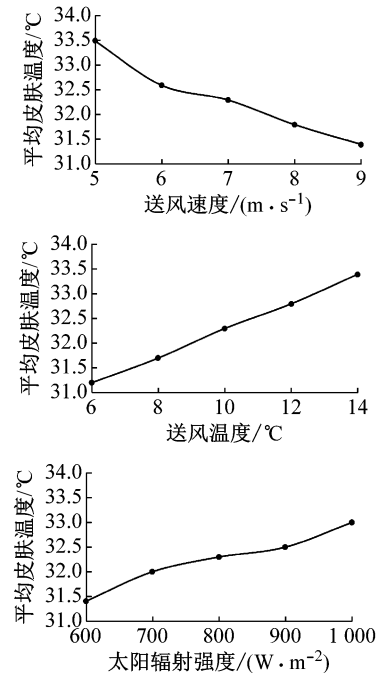
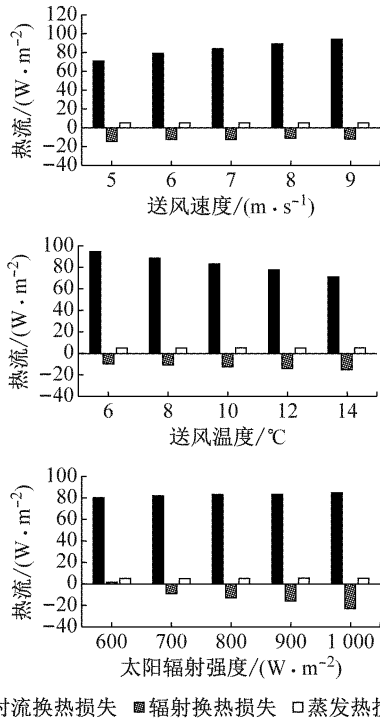


图 11 送风速度、送风温度及太阳辐射对平均皮肤温度的影响

Fig.11 Effect of supply air velocity, temperature, and solar radiation on mean skin temperature



■ 对流换热损失 ■ 辐射换热损失 □ 蒸发热损失
 图 12 送风速度、送风温度及太阳辐射对各换热方式热流的影响

Fig. 12 Effect of supply air velocity, temperature, and solar radiation on heat flux in different ways of heat-exchange

太阳辐射强度对平均皮肤温度的影响规律与对 EHT 的影响类似,即太阳辐射强度在 700~900 W · m⁻² 范围内对平均皮肤温度的影响较小.

从图 12 中可以看出,对流换热为人体与车内空调环境换热的主要方式,随着送风速度增大,对流换热损失增大,送风温度升高,对流热损失减小,而送风条件对辐射热流影响较小.此外,太阳辐射强度变化对对流换热量几乎没有影响,太阳辐射强度为 600 W · m⁻² 时,人体通过辐射散热;太阳辐射强度在 700~1 000 W · m⁻² 内变化时,人体受辐射吸热,且辐射吸热量逐渐增大,但远小于对流散热量.总的来看,蒸发散热量较小.

图 13 至图 15 分别为送风速度、送风温度及太阳辐射变化时各节段及整体 EHT 所处舒适区的变化情况.可以看出,送风角度及太阳高度角与方位角不变的情况下,人体各节段的热舒适分布几乎不变,送风速度、送风温度及太阳辐射强度的变化仅改变舒适程度.

再根据全因子设计矩阵进行 CFD 仿真得到的人体皮肤温度及干热损失,计算平均皮肤温度、整体与 14 个节段 EHT 值,对结果进行方差分析,根据式 (4) 计算各因素其两两交互作用对局部与整体

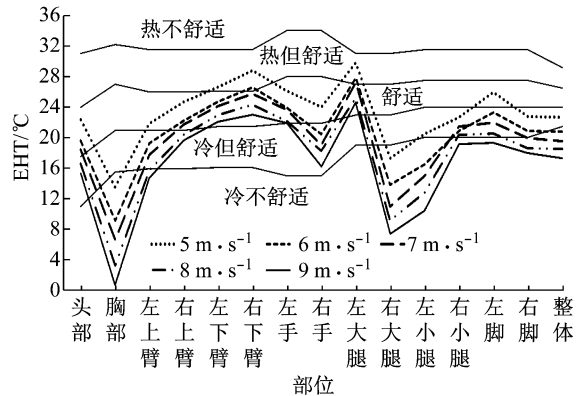


图 13 送风速度变化时所处的 EHT 热舒适区

Fig. 13 EHT thermal comfort zone as supply air speed changes

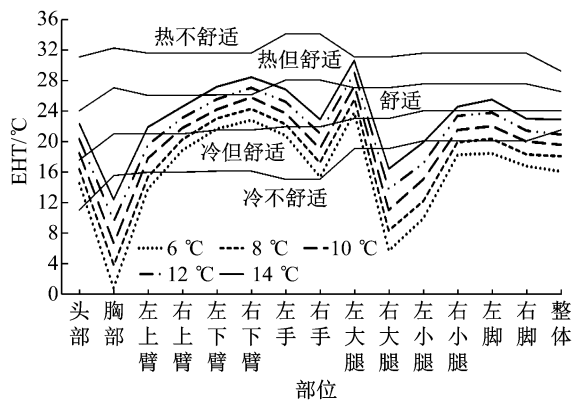


图 14 送风温度变化时所处的 EHT 热舒适区

Fig. 14 EHT thermal comfort zone as supply air temperature changes

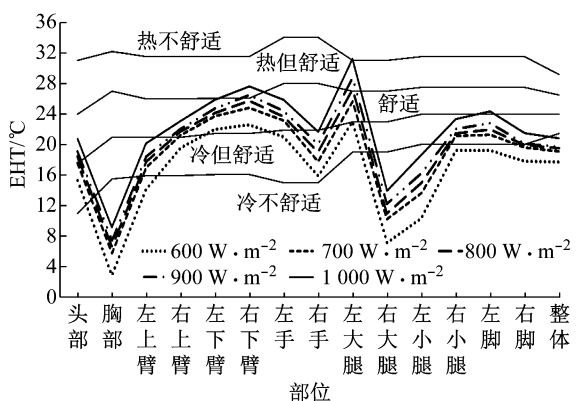


图 15 太阳辐射强度变化时所处的 EHT 热舒适区

Fig. 15 EHT thermal comfort zone as solar radiation intensity changes

EHT、平均皮肤温度与总干热损失的贡献率,结果如表 5 所示.表中, X_1 为送风速度, X_2 为送风温度, X_3 为太阳辐射强度, $X_1 * X_2$ 为送风速度与送风温度交互作用, $X_1 * X_3$ 为送风速度与太阳辐射强度交互作用, $X_2 * X_3$ 为送风温度与太阳辐射强度交互作用.

$$P_A = (S_{SA} - F_A M_{SE}) / S_{ST} \quad (4)$$

式中: P_A 为因素 A 的贡献率; S_{SA} 为因素 A 的离差平方和; F_A 为因素 A 的自由度; M_{SE} 为误差均方; S_{ST} 为总离差平方和。

从表 5 中可以看出,空调送风条件是影响整体 EHT 的关键因素,其中送风温度影响最大.由于送风条件对人体平均皮肤温度和干热损失具有较大的影响,而整体 EHT 通过平均皮肤温度和干热损失量求得,因此,送风温度对 EHT 影响最大.从表中还可以看出,各因素对整体 EHT 和干热损失的贡献率基本相同,送风速度、送风温度及太阳辐射强度之间几乎不存在交互作用。

表 5 各因素对整体 EHT、平均皮肤温度及干热损失的贡献率
Tab.5 Contribution to overall EHT, mean skin temperature, and dry heat loss

因素	整体 EHT	平均皮肤温度	干热损失
X_1	36.00	33.49	36.89
X_2	41.00	38.51	42.02
X_3	22.00	26.61	20.76
$X_1 * X_2$	0.27	0.41	0.23
$X_1 * X_3$	0.20	0.66	0.09
$X_2 * X_3$	0.94	0.17	0
误差	0.01	0.16	0

表 6 为送风速度、送风温度及太阳辐射强度对各局部 EHT 的影响权重.可以看出,仅有右手受太阳辐射强度影响大于空调送风参数,各因素对左手和右手影响权重的不同主要是因为左、右手所处的位置不同,根据太阳方位角与高度角可知,太阳位于驾驶员的右上方,对右手的照射面积较大,而左手更多地受出门风口送风的影响.此外,头部、胸部、左右大腿受送风速度影响较大,而送风温度对各个节段 EHT 均有显著影响。

表 6 3 个因素对局部 EHT 的贡献率

Tab.6 Contribution rate of the 3 factors to local EHT

部位	X_1	X_2	X_3
整体	36.00	41.00	22.00
头部	49.00	38.00	12.00
胸部	39.00	35.00	25.00
左上臂	36.00	46.00	18.00
右上臂	32.00	42.00	25.00
左下臂	34.00	38.00	28.00
右下臂	24.00	45.00	31.00
左手	33.00	42.00	24.00
右手	16.00	40.00	43.00
左大腿	41.00	39.00	19.00
右大腿	39.00	35.00	26.00
左小腿	19.00	60.00	21.00
右小腿	36.00	39.00	24.00
左脚	27.00	55.00	18.00
右脚	35.00	49.00	15.00

3.3 EHT 拟合模型

在以上分析的基础上,对 3 个因素与 EHT 的关系进行线性拟合,得到各节段及整体 EHT 拟合方程,其中整体、头部、胸部及右大腿 EHT(分别表示为 $t_{eq,e}$ 、 $t_{eq,h}$ 、 $t_{eq,c}$ 、 $t_{eq,rt}$)的拟合方程如式(5)~(8)所示.根据拟合公式可以通过送风速度、送风温度及太阳辐射强度预测整体及局部的 EHT 值。

$$t_{eq,e} = 10.210 - 1.757 2X_1 + 0.940 4X_2 + 0.013 827X_3 \quad (5)$$

$$t_{eq,h} = 1.92 - 3.168 1X_1 + 1.408 3X_2 + 0.015 953X_3 \quad (6)$$

$$t_{eq,c} = 9.46 - 1.996X_1 + 0.955 4X_2 + 0.016 10X_3 \quad (7)$$

$$t_{eq,rt} = 4.11 - 2.527X_1 + 1.212 7X_2 + 0.020 60X_3 \quad (8)$$

为了验证拟合公式的准确性,在全因子设计试验组外,以相同 CFD 仿真方法计算不同送风速度、送风温度及太阳辐射下的人体皮肤温度与热损失,即单因素分析中增加的 6 组计算工况,将得到的局部及整体 EHT 预测值与根据定义计算出来的 EHT 值进行比较,结果如图 16 所示。

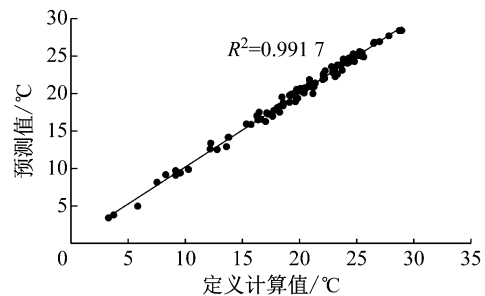


图 16 局部及整体 EHT 定义计算值与预测值对比
Fig.16 Defined value of local and whole EHT compared with predicted value

从图 16 中可以看出,拟合公式的预测准确度很高,相关系数达到 0.991 7.说明可以通过送风速度、送风温度及太阳辐射强度预测人体整体及各节段 EHT 值,而不需要得到人体皮肤温度与干热损失量.这将有助于新型空调系统控制策略设计,即将空调送风速度、送风温度及太阳辐射强度数据应用于拟合公式,预测局部与整体 EHT,以 EHT 舒适区图(图 9)中舒适范围内的 EHT 为调节指标,进行反馈控制,能够更加合理地为乘员提供车内热舒适环境。

4 结论

基于 EHT 基本概念,采用 DOE 试验设计因素

分析法及方差分析法,得到的主要结论如下:

(1) 除受到太阳大面积直射的节段右手外,空调送风条件对人体各节段与整体 EHT 的影响大于太阳辐射. 其中送风温度的影响最大. 送风条件一致时,太阳辐射强度的升高仅使 EHT 小幅度上升,而太阳辐射强度相同时,空调送风速度或温度的改变都使 EHT 的值有较为明显的增大.

(2) 送风速度、送风温度及太阳辐射三者对 EHT 的影响不存在交互作用,而送风速度、送风温度对平均皮肤温度及干热损失量的影响大于太阳辐射,因而对 EHT 的影响权重更大.

(3) 根据 EHT 拟合公式,可以通过空调送风速度、送风温度及太阳辐射强度较为准确地预测人体整体及局部 EHT 值,以此更好地设计车内空调控制策略.

在今后的研究中,可以增加空调出风角度及太阳方位角作为考虑因素,再配合全球定位系统,为车内空调控制提供更精确的方案.

参考文献:

- [1] NILSSON H O. Thermal comfort evaluation with virtual manikin methods[J]. *Building and Environment*, 2007, 42(12): 4000.
- [2] WYON D P, LARSSON S, FORSGREN B, *et al.* Standard Procedures for Assessing Vehicle Climate with a Thermal Manikin [C] // SAE International, 1989. DOI: 10. 4271/890049.
- [3] 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(7): 148.
- SONG Yajun, ZHAO Lanping, YANG Zhigang, *et al.* Analysis and improvement of the effect of solar incidence on cabin thermal comfort [J]. *Computer Simulation*, 2014(7): 148.
- [4] 赵树恩,朱冰,王荣,等. 太阳辐射对汽车舱内热环境舒适性的影响研究与改善[J]. *流体机械*, 2016(7): 70.
- ZHAO Shuen, ZHU Bing, WANG Rong, *et al.* Study of influence on the comfort of cabin thermal environment and improve cabin thermal environment comfort [J]. *Fluid Machinery*, 2016(7): 70.
- [5] 张文灿,陈吉清,兰凤崇. 太阳辐射下车窗玻璃特性对车内温度场的影响研究[J]. *机械工程学报*, 2011, 47(22): 119.
- ZHANG Wencan, CHEN Jiqing, LAN Fengchong. Research on windshield glazing property effect on cabin temperature under solar radiation[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 47(22): 119.
- [6] STOLWIJK J A, HARDY J D. Temperature regulation in man—a theoretical study[J]. *Pflugers Arch Gesamte Physiol Menschen Tiere*, 1966, 291(2): 129.
- [7] WYON D P. Use of thermal manikins in environmental ergonomics[J]. *Scandinavian Journal of Work Environment & Health*, 1989, 15(S1): 84.
- [8] HAN T, HUANG L. A model for relating a thermal comfort scale to EHT comfort index [C] // SAE International, 2004. DOI:10.4271/2004-01-0919.
- [9] NILSSON H O, HOLMER I. Comfort climate evaluation with thermal manikin methods and computer simulation models[J]. *Indoor Air*, 2003, 13(1): 28.
- [10] International Standard Organization. Ergonomic of the environment-evaluation of thermal environments in vehicles-part 2: determination of equivalent temperature; ISO 14505-2—2006[S]. Geneva: ISO, 2006.
- [11] FODA E, SIRÉN K. A thermal manikin with human thermoregulatory control: implementation and validation[J]. *International Journal of Biometeorology*, 2012, 56(5): 959.