

地铁车厢热环境下乘员热舒适 及人体温度影响因素研究

罗紫冰¹, 陈玮玮¹, 李鑫郡¹, 石金枝², 鹿世化¹

(1. 南京师范大学能源与机械工程学院, 江苏 南京 210023)

(2. 江苏省建筑设计研究院有限公司, 江苏 南京 210019)

[摘要] 采用现场实测和问卷调查的方式对地铁车厢的热环境参数及乘员的主观热感觉进行了调研, 分析了车厢热环境参数对地铁乘员热舒适的影响. 引入二节点模型对地铁空调车厢乘员的核心温度和皮肤温度进行建模, 采用有限差分法在时间单元内对耦合的非线性常微分方程组进行离散并利用 MATLAB 软件编程迭代求解. 将实测的 1 070 组实验数据与计算结果与进行对比. 结果发现, 二节点模型对地铁空调车厢人体温度的预测精度较高, 可用于分析在车厢环境下的人体温度影响因素. 人体特征与空调车厢热环境参数共同决定了人体温度的变化, 且各因素的影响能力由大至小分别为环境温度、平均辐射温度、人体代谢率、服装热阻、相对湿度和风速. 计算方法和主要结论可为地铁空调车厢乘员热舒适研究提供理论参考.

[关键词] 地铁车厢, 热环境, 二节点模型, 热舒适, 核心温度, 皮肤温度

[中图分类号] TU83 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2023)03-0001-08

Study on the Influencing Factors of Passenger Thermal Comfort and Human Body Temperature in the Thermal Environment of Subway Cars

Luo Zibing¹, Chen Weiwei¹, Li XinJun¹, Shi Jinzhi², Lu Shihua¹

(1. School of Energy and Mechanical Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

(2. Jiangsu Provincial Architectural Design and Research Institute Co., Ltd, Nanjing 210019, China)

Abstract: The thermal environment parameters of subway cars and subjective thermal sensation of passengers are investigated by field measurement and questionnaire. The influence of thermal environment parameters on the thermal comfort of subway passengers is analyzed. A two-node model is introduced to model the core temperature and skin temperature of the passengers in the subway air-conditioned car. The finite difference method is used to discretize the coupled nonlinear ordinary differential equations in the time unit, and the MATLAB software is used to program the solution iteratively. The 1 070 sets of experimental data measured and the calculated results are compared. The results show that the prediction accuracy of the two-node model is high, so it can be used to analyze the influencing factors of human body temperature in the subway car environment. The thermal environment parameters of the subway air-conditioned car and the human body characteristics jointly determine the variation of human body temperature. The influencing ability of each factor from large to small is the ambient temperature, mean radiation temperature, human metabolic rate, dress heat resistance, relative humidity, and wind speed. The calculation methods and main conclusions of this paper can provide a theoretical reference for the research on the thermal comfort of passengers in air-conditioned subway cars.

Key words: subway car, thermal environment, two-node model, thermal comfort, core temperature, skin temperature

随着城市交通的快速发展, 由于快捷、便利及准时等优点, 地铁成为了大多数上班族出行的首选交通工具. 但由于地铁车厢人流量大、人员密集且空间封闭, 多存在温度过高或过低、吹风感强烈、空气品质低、噪音大等问题, 影响了乘员的舒适性、乘坐体验和身体健康^[1-3]. 近些年关于地铁车厢的舒适性问题引起了国内外研究者较多的关注.

收稿日期: 2022-09-20.

通讯作者: 陈玮玮, 博士, 讲师, 研究方向: 建筑节能与人体热舒适, E-mail: chenweiwei@njnu.edu.cn

PMV 指标是由 Fanger^[4]提出的,是人员对稳态热环境的预期反映。但 PMV 模型一般不适用于地铁等瞬态非均匀热环境,因其预测结果与实际情况可能差异较大^[5]。王海英等^[6]对 PMV 热舒适模型适用性进行分析时发现在现场研究中 PMV 热舒适模型对实际热感觉的预测是不准确的。Pan 等^[7]采用了一种动态热舒适的研究方法,得到地铁乘客的热感觉在整个乘车过程中是处于剧烈变化的。朱培根等^[8]对地铁站乘员的动态热舒适采用了热感觉投票和相对热指标 RWI 相结合的方法进行评价,得到乘客的舒适感会随着 RWI 的变化而发生改变。徐科飞等^[9]运用了线性回归及空调编辑器等方法,计算出了考虑地铁乘客状态动态变化的 PMV 计算方法,证明了动态情况下的模拟值更接近人体真实的热感觉。蒋毅等^[10]基于实测数据对二节点模型在我国室外动态热环境中的应用进行了模拟精度分析和吻合度检验,得到 Gaage 二节点模型在进行黄种人的生理量预测时,预测值大多高于实际值,并对此进行了修正。童力等^[11]、王美楠^[12]对二节点模型在低压环境的适用性进行了研究,验证了低压下平均皮肤温度模型值与实验值吻合较好,并对其进行了低压下的改进。陈瑾等^[13]利用 MATLAB 求解简化后的 Gagge 二节点模型,并将其应用于井下矿工的热舒适评价中。结果表明,矿工的皮肤温度与新陈代谢率呈正相关关系,而舒适程度则与之相反。





由于地铁车厢热湿环境的影响因素较为复杂,车厢内乘员的热舒适及其皮肤温度和核心温度随车厢热环境参数的变化规律尚不明晰,因此本文采用现场实测及问卷调研相结合的办法获得了乘员周围的热湿环境参数及其主观热感受,并基于实测数据研究了地铁热环境参数对乘员热舒适的影响。由于乘员热舒适受人体皮肤温度及核心温度的影响,人体皮肤温度及核心温度的变化可利用 Gagge 二节点模型进行建模,可为热舒适的研究提供更加准确的理论依据。因此,本文以 Gagge 二节点模型基本方程为基础,求解人体皮肤温度及核心温度,以此反映出人体温度随车厢热湿环境参数的变化,并分析了地铁车厢热环境因素及乘员特征对热舒适的影响规律。

1 地铁车厢热环境参数测量及乘员问卷调查

1.1 车厢热环境参数测量

为了定量研究乘员在地铁空调车厢内的热环境参数,获得乘客周围实时的热环境参数,本文对南京市运营的 10 条地铁线路(S7-S9 号线、1-4 号线、S1 号线、S3 号线和 10 号线)车厢内平均辐射温度 t_{mrt} 、环境温度 t_{am} 、气流速度 v 、相对湿度 RH 等地铁热环境参数进行了测量。实验时间设置为 8:00~10:00,12:00~14:00,16:00~18:00,此 3 个时间段涵盖了地铁的平峰段及早晚高峰段。实验时,4 名调研组成员需手持红外热成像仪、黑球温度计、热敏风速测量仪及空气品质检测仪对乘员周围热环境进行实时测量。实验所用主要仪器规格如表 1 所示。

表 1 实验过程中仪器的规格说明
Table 1 Specification of the instrument used in the experiment

名称	红外热成像仪	黑球温度计	热敏风速测量仪	空气品质检测仪
型号	ST9450	AZ8778	AR866A	AM7P
仪器图片				
技术参数	测温范围: -25~450 ℃ 测量误差: (±2±2%) ℃ 储存温度: -40~60 ℃	测温范围: 0~50 ℃ 湿度测量范围: 0~100% 测量误差: (±0.6±3%) ℃	风速测量范围: 0~30 m/s 风速测量误差: ±1% 风温测量范围: 0~45 ℃	测温范围: -25~85 ℃ 湿度测量范围: 0~99% 测量误差: (±1±8%) ℃

1.2 乘客问卷调查

为了分析乘客热舒适和车厢环境参数之间的联系,在进行地铁车厢热环境参数测量的同时,还对乘客进行了问卷调查,采集乘客的衣着情况、身高、体重、性别、年龄以及主观热感觉,其问卷设置情况如表 2 所示。由于本次测量是在夏季进行的,所以根据夏季常见服装设置了乘客衣着情况选项。乘客的热舒适评价可以采用其在车厢内的主观热感觉投票来反映,该投票值的设置参照了 7 级分度指标^[14],即热感觉投票

取-3(很冷),-2(冷),-1(有点冷),0(中性),1(有点热),2(热),3(很热). 由图 1 可知,平峰段的数据占 63.32%,而高峰段的数据占比为 37.68%.

表 2 问卷设置情况
Table 2 The content of the questionnaire

问卷调查表			
1、性别:	女 <input type="checkbox"/>	男 <input type="checkbox"/>	
2、年龄:		3、身高:	4、体重:
5、衣着情况:			
上装:	短袖衬衫 <input type="checkbox"/> 长袖衬衫 <input type="checkbox"/> 圆领T恤 <input type="checkbox"/> 短袖针织运动衫 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>		
下装:	短裤 <input type="checkbox"/> 薄长裤 <input type="checkbox"/> 运动裤 <input type="checkbox"/> 工装裤 <input type="checkbox"/> 薄裙子 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>		
鞋类:	凉鞋 <input type="checkbox"/> 运动鞋 <input type="checkbox"/> 皮鞋 <input type="checkbox"/> 靴子 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>		
袜子:	短运动袜 <input type="checkbox"/> 半长袜 <input type="checkbox"/> 连裤袜 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>		
其他:	短袖薄连衣裙 <input type="checkbox"/> 皮带 <input type="checkbox"/> 单排扣薄上衣 <input type="checkbox"/>		
6、热感觉投票:	很冷(-3) <input type="checkbox"/>	冷(-2) <input type="checkbox"/>	有点冷(-1) <input type="checkbox"/>
中性(0) <input type="checkbox"/>	有点热(+1) <input type="checkbox"/>	热(+2) <input type="checkbox"/>	很热(+3) <input type="checkbox"/>

1.3 实验结果分析

通过地铁环境现场实测和调研,本文共获得热环境数据和问卷调查结果 1 085 组,剔除部分无效数据点,共保留热环境数据和问卷结果 1 070 组. 图 2 为地铁车厢内热环境参数对乘员热感觉的影响,由图可以看出大部分乘客的热感觉投票为热中性,但仍有小部分乘员感到热或冷.

在图 2(a)中,车厢环境温度 t_{am} 主要分布在 24~28 ℃. 当车厢温度在 20~24 ℃ 内上升时,大部分车厢乘员的热感觉投票为 0,但仍有小部分乘员的热感觉投票小于 0,而热感觉投票大于 0 的乘员比例非常小. 当车厢温度高于 24 ℃ 后,乘员热感觉投票大于 0 的比例增大. 由图 2(b)可以看出随着车厢内相对湿度 RH 的上升,感觉到热的乘客人数上升. 从图 2(c)可以看出,车厢内风速 v 主要

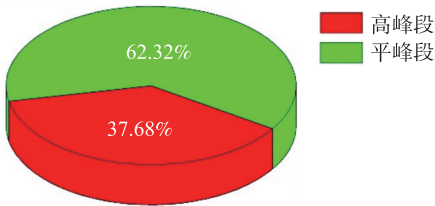


图 1 问卷调查及数据占比情况
Fig. 1 The situation of questionnaire survey and data proportion

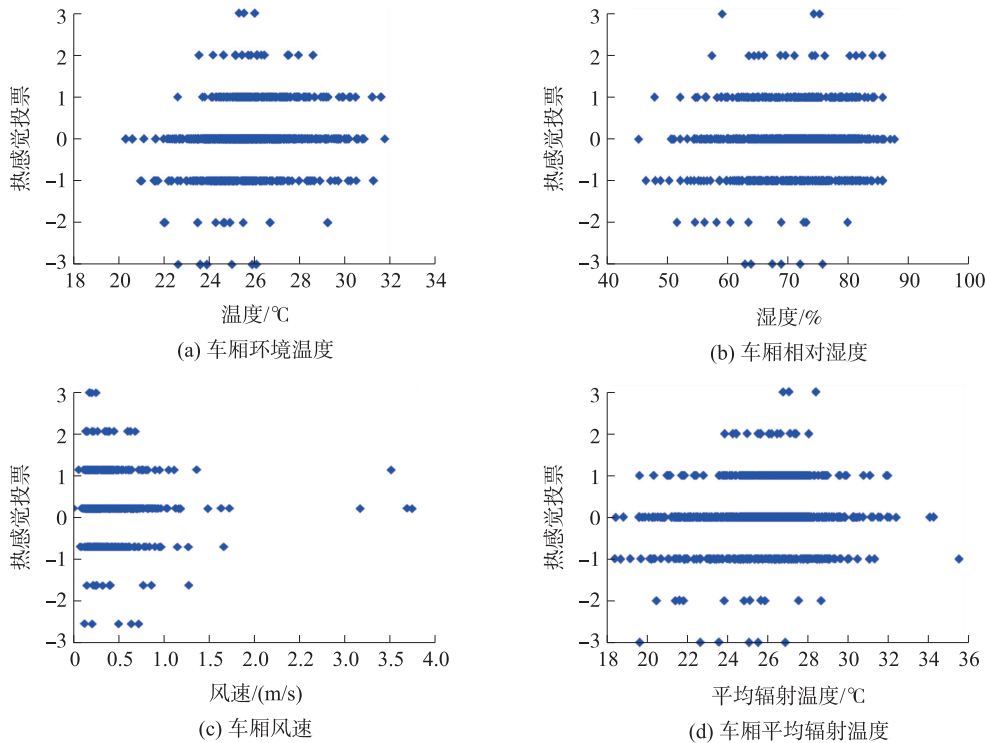


图 2 车厢热环境参数对乘员热感觉的影响
Fig. 2 Influence of thermal environment parameters on passenger thermal sensation

在 0.1~1.0 m/s 间变化,整体风速较大. 当车厢风速在 0.6~1.0 m/s 内,随着风速上升,热感觉为冷或热的乘客人数下降. 在图 2(d)中,乘员热感觉投票为有点热的车厢平均辐射温度 t_{mr} 主要分布在 24~28 ℃.

图 3 展示了地铁车厢内平均热环境参数与平均热感觉投票间的关系. 在图 3(a)中,随着车厢平均环境温度上升,平均热感觉投票在-0.6~0.6 之间变化. 由图 3(b)可以看出车厢平均相对湿度的变化导致平均热感觉投票在-0.3~0.2 之间变化. 而在图 3(c)和图 3(d)中,随着车厢平均风速和平均辐射温度的上升,平均热感觉投票分别由 0 变化到-0.4,-0.4 变化到 0.23. 车厢平均热环境温度所造成的平均热感觉投票变化最大,其后依次为平均辐射温度、平均相对湿度和平均风速. 即车厢的热环境参数对乘员热舒适的影响由大到小为环境温度、平均辐射温度、相对湿度、风速.

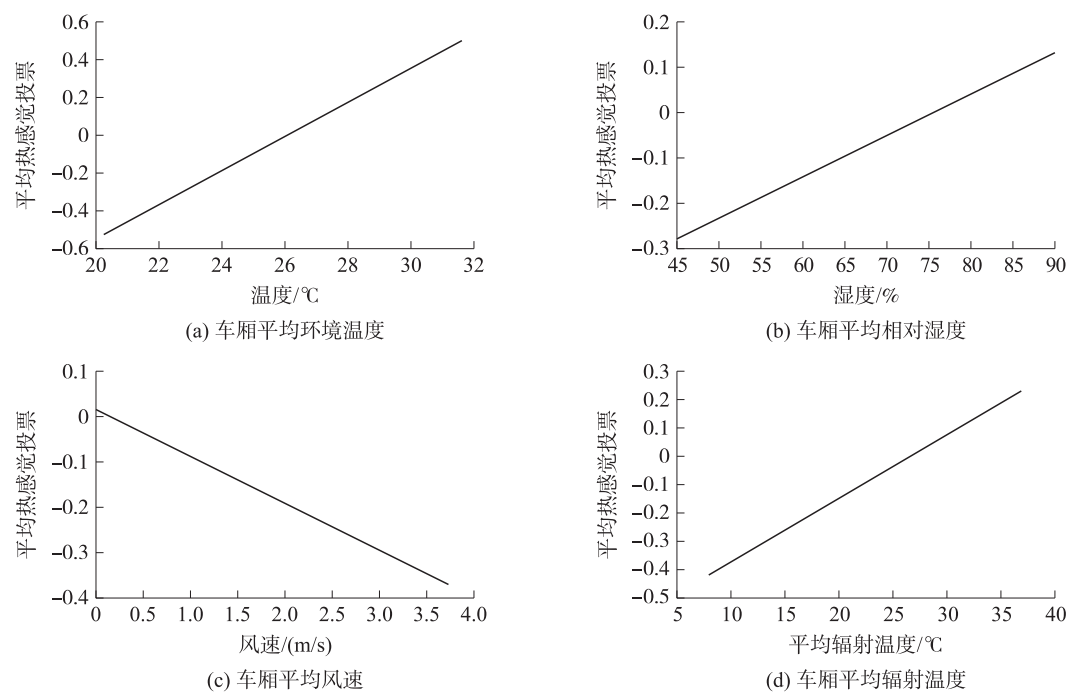


图 3 车厢平均热环境参数与平均热感觉投票间的关系

Fig. 3 The relationship between average thermal environment parameters of subway cars and average thermal sensation voting

2 人体温度的影响因素研究

2.1 人体皮肤温度

人体皮肤温度的高低直接影响着人体与外界的对流换热量及辐射换热量,进而影响了人体的热舒适,因此有必要对人体皮肤温度进行研究. 本文采用红外热成像仪对调查目标的皮肤温度进行采集,如图 4 所示. 从图中可以看出乘员各部分皮肤温度的分布是不均匀的,其中腿部温度最低,头和前胸等部位最高. 虽然乘员皮肤温度可以通过测量获得,但是无法获知车厢内热环境参数对乘员皮肤温度的影响,需对人体皮肤温度进行建模研究,因此本文引进二节点模型来对人体皮肤温度与车厢热环境间的关系进行研

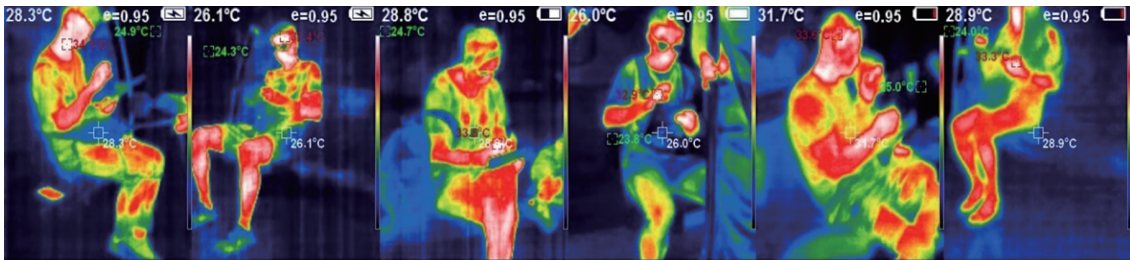


图 4 乘客皮肤温度分布图

Fig. 4 The distribution of skin temperature

究^[15]. 乘客的平均皮肤温度 t_{sk} 为

$$t_{sk} = 0.34t_0 + 0.15t_1 + 0.33t_2 + 0.18t_3. \quad (1)$$

式中, t_{sk} 为平均皮肤温度, $^{\circ}\text{C}$. t_0, t_1, t_2, t_3 分别为乘客前胸、手臂、大腿及小腿温度, 具体数值可由红外热成像仪获得, $^{\circ}\text{C}$.

2.2 二节点模型基本理论

热舒适是人体对自身热平衡和周围环境的综合判断. 当地铁乘客处于热平衡状态时, 蓄热率为 0, 此时乘客处于热舒适的状态. 当核心温度 t_{cr} 和皮肤温度 t_{sk} 小于正常值时, 蓄热率小于 0, 乘客会产生冷的感觉. 与之相对, 当核心温度 t_{cr} 和皮肤温度 t_{sk} 大于正常值时, 蓄热率大于 0, 乘客会产生热的感觉. 因此本文利用二节点模型对地铁乘客的热平衡状态进行定量描述, 通过对地铁乘客核心温度 t_{cr} 和皮肤温度 t_{sk} 的求解来获取乘客的热反应, 以此来反映乘客的热舒适.

二节点模型是由 Gagge 等^[16] 提出, 它是一种人体温度调节的数学模型. 如图 5 所示, Gagge 二节点模型将人体看作内外两层, 内层为核心层, 新陈代谢在此产生, 产生的热量通过皮肤与环境间的热交换、呼吸作用和服装散发.

人体的核心层的动态热平衡方程如下^[17]:

$$m_{cr} c_{cr} \frac{dt_{cr}}{dt} = A_D [M + \Delta M - W - (C_{res} + E_{res}) - H_{cs}]. \quad (2)$$

式中, m_{cr} 为人体的核心质量, kg . c_{cr} 为人体的核心比热, $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$. t_{cr} 为人体的核心温度, $^{\circ}\text{C}$. M 为人体能量代谢率, W/m^2 . ΔM 为人体冷颤增加的代谢率, W/m^2 . W 为人体所做的机械功, W/m^2 . C_{res} 为呼吸时的显热流, W/m^2 . E_{res} 为呼吸时的潜热流, W/m^2 . H_{cs} 为通过血液流动和导热从核心流向皮肤的热流, W/m^2 .

人体的皮肤层的动态热平衡方程如下^[17]:

$$m_{sk} c_{sk} \frac{dt_{sk}}{dt} = A_D (H_{cs} - C - R - E_{sk}). \quad (3)$$

式中, m_{sk} 为人体皮肤的皮肤质量, kg . c_{sk} 为人体皮肤的皮肤比热, $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$. A_D 为人体皮肤表面积^[18], m^2 . C 为对流换热量, W/m^2 . R 为辐射换热量, W/m^2 . E_{sk} 为皮肤蒸发散热量, W/m^2 .

人体的核心质量 m_{cr} 、人体的皮肤质量 m_{sk} 及通过血液流动和导热从核心流向皮肤的热流 H_{cs} 的计算公式为^[17]:

$$m_{cr} = m_b (1 - \alpha), \quad (4)$$

$$m_{sk} = m_b \alpha, \quad (5)$$

$$H_{cs} = \left(C_{bl} \rho_{bl} \frac{125 + 175 \text{wsig}_{cr}}{1 + 0.5 \text{csig}_{sk}} \div 3.6 + K \right) \times (t_{cr} - t_{sk}). \quad (6)$$

式中, m_b 为人体质量, kg . α 为皮肤质量比. C_{bl} 为血液的比热, $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$. ρ_{bl} 为血液密度, kg/m^3 . K 为皮肤组织的最小导热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$. csig_{sk} 为皮肤冷信号, $^{\circ}\text{C}$. wsig_{cr} 为核心热信号, $^{\circ}\text{C}$.

来自心脏和皮肤的冷信号可用于描述冷颤所引起的代谢率的增加^[17]:

$$\Delta M = 19.4 \text{csig}_{cr} \text{csig}_{sk}. \quad (7)$$

式中, csig_{cr} 为核心冷信号, $^{\circ}\text{C}$.

人体代谢率 M 及人体所做的机械功 W 的计算公式如下^[18]:

$$M = 0.048 \, 43 \frac{BMR}{A_D} F_a, \quad (8)$$

$$W = \eta M. \quad (9)$$

式中, BMR 为人体基础代谢率^[19], kcal/d . F_a 为姿态修正系数(当乘客站立时取 1.2, 乘客坐着时取 1.0).

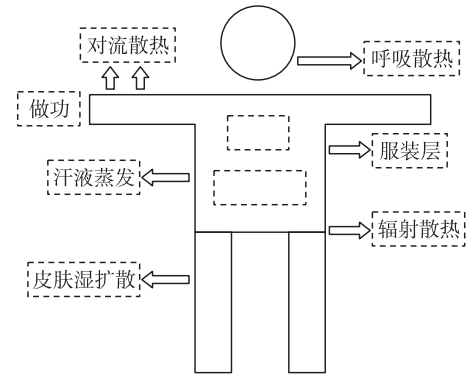


图 5 二节点模型示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the two-node model

η 为人体对外做工的机械效率^[14](地铁内 η 一般为 0)。

人体与环境间存在着由于对流散失的热量,计算公式为^[14]:

$$C=f_{cl}h_c(t_{gs}-t_{am}). \quad (10)$$

式中, f_{cl} 为服装的面积系数. h_c 为对流换热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$. t_{gs} 为服装表面的温度, $^\circ C$. t_{am} 为空气干球温度, $^\circ C$.

人体与环境间存在着通过非接触并以射线方式进行的散热,其辐射换热热量 R 计算公式为^[20]:

$$R=h_l f_{cl}(t_{gs}-t_{mrt}). \quad (11)$$

式中, h_l 为线性的辐射换热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$. t_{mrt} 为平均辐射温度, $^\circ C$.

总蒸发换热量 E 包括呼吸时的潜热流 $E_{res}^{[21]}$ 、显热流 $C_{res}^{[21]}$ 及皮肤蒸发散热量 $E_{sk}^{[22]}$,其计算公式为:

$$E_{res}=0.002\ 3M(44-P_{am}), \quad (12)$$

$$C_{res}=0.001\ 4M(34-t_{am}), \quad (13)$$

$$E_{sk}=\omega h_e(P_{sk}-P_{am}). \quad (14)$$

式中, P_{am} 为水蒸气分压力,mmHg. ω 为皮肤湿润. h_e 为蒸发换热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$. P_{sk} 为饱和水蒸气分压力,mmHg.

2.3 二节点模型的求解及验证

二节点方程模型是关于人体皮肤温度 t_{sk} 和核心温度 t_{cr} 的非线性常微分方程,且两个方程是互相耦合的,通过理论推导来得出方程的解析解难度太高,因此本文采用有限差分法,在时间单元内对双方程进行差分离散,然后利用 MATLAB 编程迭代求解其数值解.

由于双方程的右侧都是关于皮肤温度 t_{sk} 和核心温度 t_{cr} 的函数,因此原动态热平衡方程组可以表述为,

$$\begin{aligned} \frac{dt_{cr}}{dt} &= \frac{A_D}{m_{cr}c_{cr}}[M+\Delta M-W-(C_{res}+E_{res})-H_{cs}]=F(t_{sk},\Delta t_{cr}), \\ \frac{dt_{sk}}{dt} &= \frac{A_D}{m_{sk}c_{sk}}[H_{cs}-C-R-E_{sk}]=G(t_{sk},\Delta t_{cr}). \end{aligned} \quad (15)$$

若在等式两边进行差分,可以得出相邻两个计算时刻(间隔(t))的等式关系为,

$$\begin{aligned} \frac{t_{cr}^{n+1}-t_{cr}^n}{\Delta t} &= F(t_{sk}^n,\Delta t_{cr}^n), \quad \Delta t_{cr}^{n+1}=t_{cr}^n+\Delta t F(t_{sk}^n,\Delta t_{cr}^n), \\ \frac{t_{sk}^{n+1}-t_{sk}^n}{\Delta t} &= G(t_{sk}^n,\Delta t_{cr}^n), \quad \Delta t_{sk}^{n+1}=t_{sk}^n+\Delta t G(t_{sk}^n,\Delta t_{cr}^n). \end{aligned} \quad (16)$$

编程求解时,根据上文计算模型,以及皮肤温度 t_{sk} 和核心温度 t_{cr} 在 $n=0$ 初始时刻的值,求解出 $n=0$ 时刻的 $F(t_{sk},t_{cr})$ 和 $G(t_{sk},t_{cr})$,代入以上差分方程可得出 $n=1(\Delta t)$ 时刻的皮肤温度 t_{sk} 和核心温度 t_{cr} ,以此类推,重复迭代即可获得所有计算时刻的 t_{sk} 和 t_{cr} 值.以上过程在 MATLAB 中编程实现,其具体实施流程如图 6 所示.

根据现场调查获得的 1 070 组数据,利用 MATLAB 对二节点模型进行计算,并将计算获得的皮肤温度与实测获得的皮肤温度进行对比,最后获得了绝对误差的对比图,如图 7 所示.由图可知,通过实测获得的 1 070 组数据中,85%的数据绝对误差在 $\pm 3\ ^\circ C$ 以内,只有极少的数据绝对误差大于 $\pm 4\ ^\circ C$,总体平均绝对误差为 $1.5\ ^\circ C$.误差来源包括仪器自身误差、仪器使用过程中的测量误差以及采用式(1)来求解人体平均皮肤温度所带来的误差.

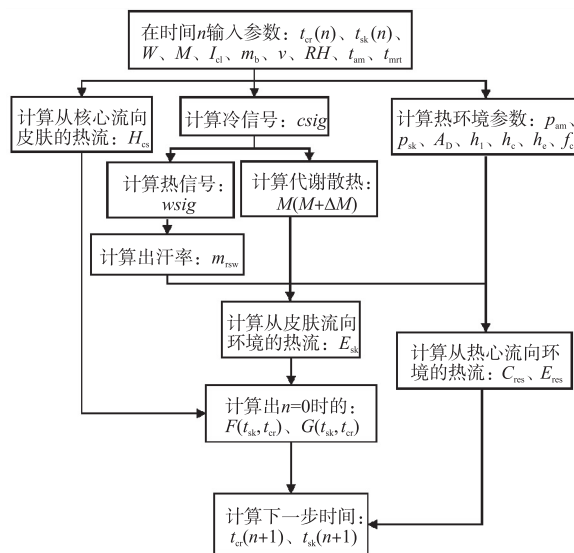


图 6 二节点模型求解过程

Fig. 6 The solving process of two-node model

2.4 结果分析

基于上文获得的实测数据,定义了一种“典型工况”,该工况包括乘客特征和车厢环境参数,具体为:乘客身高 1.73 m,体重 69 kg,代谢率 65 W/m^2 ,服装热阻 0.5 clo,周围风速 0.4 m/s,相对湿度 58%,环境温度 25°C ,平均辐射温度 24.3°C ,静止站立不做功。

本文以“典型工况”为基础,将某个典型参数在 $\pm 50\%$ 的范围内进行改变,并保持其它典型参数不变,以此研究车厢热环境参数对乘客动态热反应产生的影响,这些典型参数包括乘员代谢率、服装热阻,车厢环境相对湿度、温度、风速以及平均辐射温度,由于身高、体重等乘员特征仅影响乘员代谢率,因此不再单独讨论。图 8 为典型参数变化对乘员核心温度及皮肤温度产生的影响,由图 8(a) 可以看出来,随着人体代谢率的增加,乘客核心温度先迅速增长,后增速缓慢。在图 8(d) 及图 8(f) 中,当车厢温度及平均辐射温度上升时,乘客核心温度也在逐渐上升,在 37°C 附近小幅变化,而随着车厢相对湿度及风速的增加,乘客核心温度在 37°C 附近基本没有变化。这表明人体的核心温度主要由其运动负荷(代谢率)所决定,与外界环境参数的变化关系不大。

图 8 中的典型参数仅有风速的增加使皮肤温度下降,如图 8(e) 所示。这是由于随着风速的增加,对流传热带走的显热增加,同时汗液蒸发也加快,带走了更多潜热,两者共同导致了皮肤温度的下降。由图 8(d) 与图 8(f) 所示,随着车厢温度及平均辐射温度的上升,皮肤温度均为先迅速增长后增速减缓,增

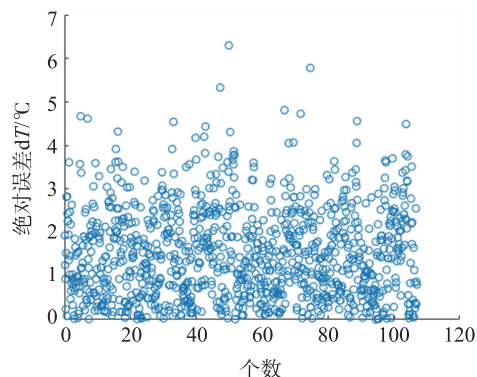


图 7 计算皮肤温度与测量皮肤温度的绝对误差

Fig. 7 Absolute error between calculated skin temperature and measured skin temperature

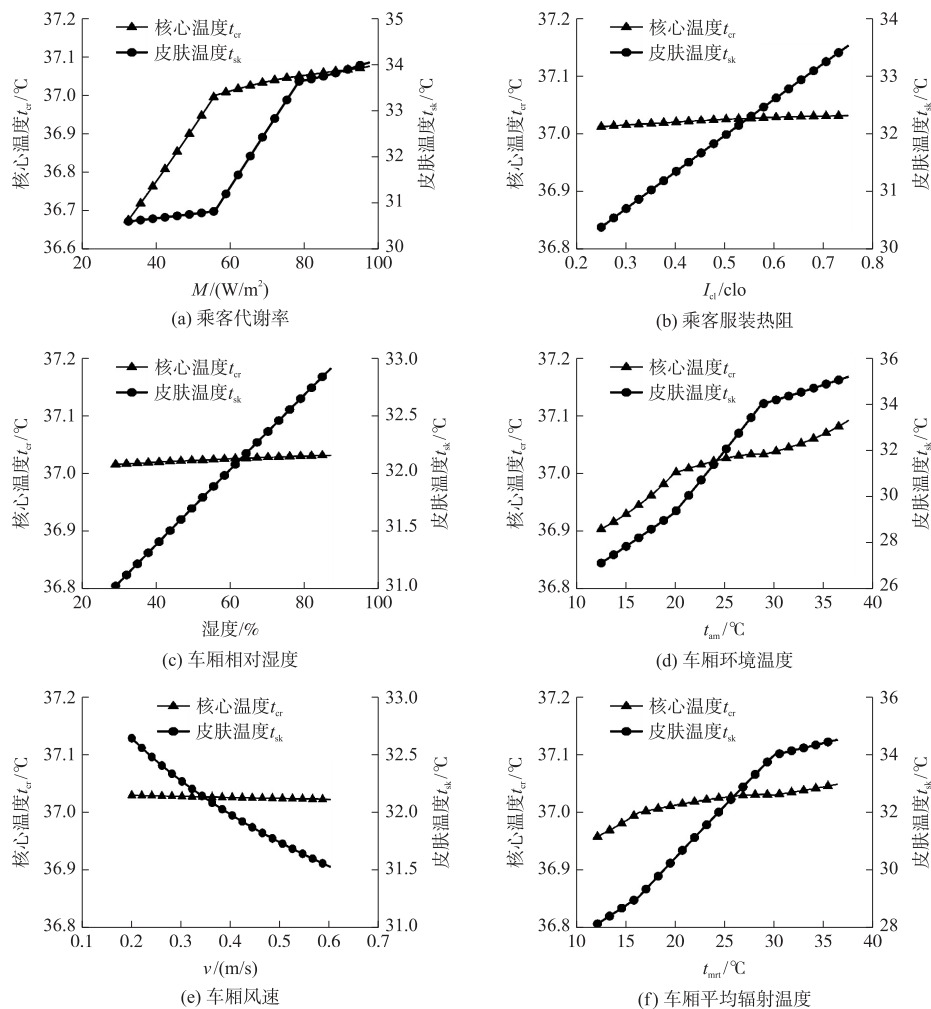


图 8 典型参数对乘客核心温度及皮肤温度的影响

Fig. 8 Influence of typical parameters on core temperature and skin temperature of passengers

长速度较快. 在图 8(b) 及图 8(c) 中, 当服装热阻及相对湿度增加时, 皮肤温度基本呈线性增加.

由上述分析可以看出, 核心温度受人体代谢的影响最大, 两者之间关系为正相关, 其它因素对核心温度造成影响很小. 所讨论的 6 个典型参数对皮肤温度 t_{sk} 的影响由大至小为: 环境温度 t_{am} 、平均辐射温度 t_{mrt} 、人体代谢率 M 、服装热阻 I_{cl} 、相对湿度 RH 、风速 $v(t_{am} > t_{mrt} > M > I_{cl} > RH > v)$.

3 结论

本文通过对南京市运营的 10 条地铁线路车厢内的热环境参数的实测和对乘客主观热感觉的问卷调查, 获得了 1 070 组关于乘员热舒适的数据, 基于该数据的研究结论如下:

(1) 车厢环境实测数据和问卷结果表明, 大部分乘客的热感觉投票为热中性, 但仍有小部分乘员感到热或冷. 车厢热环境参数对乘员热感觉投票的影响由大到小为环境温度、平均辐射温度、相对湿度和风速.

(2) 利用二节点模型对地铁乘员的热平衡状态进行定量描述, 通过对地铁乘员核心温度 t_{cr} 和皮肤温度 t_{sk} 的求解来获取乘员的热舒适. 计算结果与地铁实测数据的对比结果显示, 二节点模型对地铁热舒适的预测精度较高, 其测量皮肤温度及计算皮肤温度平均预测误差为 1.5 °C.

(3) 分析了 6 个典型参数对乘员核心温度和皮肤温度的影响, 结果发现, 人体的核心温度只与代谢率密切相关, 所讨论的 6 个典型参数对皮肤温度的影响由大至小为环境温度、平均辐射温度、人体代谢率、服装热阻、相对湿度、风速.

[参考文献] (References)

- [1] 刘晶. 探究风道结构优化对地铁车室内气流组织均匀性影响[J]. 科技风, 2021, 34(4): 117-118.
- [2] 吴嘉钰, 赵蕾, 李德辉, 等. 基于实测数据浅析西安地铁站空调运行参数[J]. 暖通空调, 2019, 49(11): 119-124.
- [3] 朱能, 刘珊. 置换通风与冷却顶板的热舒适性研究[J]. 制冷学报, 2000, 22(4): 64-70.
- [4] FANGER P O. Thermal comfort, analysis and application in environmental engineering[M]. Copenhagen: Danish Technical Press, 1970.
- [5] 吴清清, 柳建华, 张良, 等. 非对称热环境下人体热舒适度模型研究进展[J]. 制冷学报, 2020, 41(2): 79-86.
- [6] 王海英, 胡松涛. 对 PMV 热舒适模型适用性的分析[J]. 建筑科学, 2009, 25(6): 108-114.
- [7] PAN S, LIU Y, XIE L, et al. A thermal comfort field study on subway passengers during air-conditioning season in Beijing[J]. Sustainable Cities and Society, 2020, 61: 102218.
- [8] 朱培根, 王春旺, 仝晓娜, 等. 地铁站乘客动态热舒适评价研究[J]. 暖通空调, 2016, 46(2): 101-104.
- [9] 徐科飞, 夏积玉, 王刚. 地铁车厢热舒适评价时乘客状态及参数的确定[J]. 青岛理工大学学报, 2018, 39(3): 79-84.
- [10] 蒋毅, 赵立华, 孟庆林. 湿热地区室外动态热环境中二节点模型的验证及修正[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2020, 42(1): 168-179.
- [11] 童力, 胡松涛. 低气压环境下 Gagge 两节点模型的探究[J]. 建筑科学, 2015(2): 37-42.
- [12] 王美楠. 低气压环境下二节点人体热调节模型研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2013.
- [13] 陈瑾, 吴世跃, 柴琳. 基于 Gagge 二节点模型的井下气候条件评价[J]. 矿业安全与环保, 2019, 46(3): 104-107.
- [14] 朱颖心. 建筑环境学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [15] 王丽娟, 张盟盟, 左国栋, 等. 夏季相同热偏好男女之间的热反应差异[J]. 西安工程大学学报, 2022, 36(1): 70-75.
- [16] GAGGE A P, STOLWIJK J A J, NISHI Y. An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response[J]. Memoirs of the Faculty of Engineering, Hokkaido University, 1972, 13: 21-36.
- [17] TAKADA S, SAKIYAMA T, MATSUSHITA T. Validity of the two-node model for predicting steady-state skin temperature[J]. Building and Environment, 2011, 46(3): 597-604.
- [18] DU BOIS D, DU BOIS E F. Clinical calorimetry: tenth paper a formula to estimate the approximate surface area if height and weight be known[J]. Archives of Internal Medicine, 1916, 17: 863-871.
- [19] 陈丽萍, 胡尔西旦·那斯尔, 齐曼古力·吾尔. 代谢率与 Harris-Benedict 公式在慢性阻塞性肺疾病患者营养支持的对比研究[J]. 新疆医科大学, 2007, 30(12): 1360-1363.
- [20] 陈瑾. 人体热调节模型的改进及其在矿井热环境评价中的应用[D]. 太原: 太原理工大学, 2019.
- [21] FODA E, KAI S. A new approach using the Pierce two-node model for different body parts[J]. International Journal of Biometeorology, 2011, 55(4): 519-532.
- [22] GAGGE A P, FOBELETS A P, BERGLUND L G. A standard predictive index of human response to the thermal environment[J]. ASHRAE Trans, 1986, 92(2): 709-731.

[责任编辑: 陈 庆]