

同车不同温空调设定模式下的地铁 列车车厢热舒适性分析

陈阳¹ 徐峻² 臧建彬³ 王涛¹ 陈广旭¹

(1. 上海电力大学能源与机械工程学院, 200090, 上海; 2. 中车长春轨道客车股份有限公司, 130062, 长春;
3. 同济大学机械与能源工程学院, 200092, 上海//第一作者, 硕士研究生)

摘要 通过分析 PMV-PPD(预测平均投票数-预测不满意百分比)热舒适性指标, 基于夏季列车内环境参数, 计算最舒适热环境下空气温度与乘客新陈代谢率的关系。发现列车内不同新陈代谢率的乘客达到最舒适状态时所需的温度不同。地铁列车采取同车不同温的空调设定模式后乘客的平均不满意率降低。以某市地铁为例, 分析了强冷车厢和弱冷车厢不同分布方案的平均不满意率。研究结果表明: 列车前3节车厢为强冷车厢、后3节为弱冷车厢时, 整车的平均不满意率平均值最低。

关键词 地铁车厢; 空调; 热舒适性; 同车不同温

中图分类号 U270.38⁺3

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.12.031

Thermal Comfort Analysis of Metro Train Compartment under Air-conditioning Setting Mode of One Train with Multiple Tempera- tures

CHEN Yang, XU Jun, ZANG Jianbin, WANG Tao,
CHEN Guangxu

Abstract By analyzing the thermal comfort index of PMV-PPD (predicted mean vote-predicted percentage dissatisfied), based on the train interior environmental parameters in summer, the relationship between air temperature and passenger metabolic rate in the most comfortable thermal environment is obtained. It is found that the temperatures required by passengers with different metabolic rates to reach the most comfortable states are different. The average dissatisfaction rate of passengers decreases after the metro train adopting the air-conditioning setting mode of one train with multiple temperatures. Taking metro in a certain city as an example, the average dissatisfaction rate of different distribution schemes of strong and weak cold compartments is analyzed. Results show that the average dissatisfaction rate of the whole train is the lowest when the first three compartments are strong cold and the last three compartments are weak cold.

Key words metro compartment; air-conditioning; thermal comfort; one train with multiple temperatures

First-author's address College of Energy and Mechanical Engineering, Shanghai University of Electric Power, 200090, Shanghai, China

地铁车厢热环境的舒适性是乘客高度关注的一个方面。车厢内温度过高或过低, 都会影响乘客乘坐体验。现实中个体乘客的体感也存在差异性, 导致地铁乘客投诉中央空调问题一直居高不下。为了进一步提高服务质量, 北京、西安及长沙等多地于2019年6月采取了同车不同温的空调设定模式, 在不同车厢设定不同温度, 使乘客可按需选择车厢搭乘。

近年来, 虽有众多学者采用 RWI(相对热指标)、ADPI(空气分布特性指标)、PMV(预测平均投票数)等热舒适性指标来研究地铁热舒适性问题^[1-2], 但其研究主要针对地铁车站的站厅及站台等, 对列车内热环境的研究还较少。而针对列车内热环境舒适性的研究前提都是所有车厢均为同一温度, 未考虑同车不同温的情况。本文通过 PMV-PPD(预测平均投票数-预测不满意百分比)热舒适性指标来分析不同代谢率的乘客在不同温度下的最佳热舒适环境, 为提高乘客舒适性提供参考依据。

1 PMV-PPD 指标分析

Fanger 教授于1967年发表了著名的热舒适方程式^[3], 于1970年对试验得出的4种新陈代谢率情况下的热感觉数据进行曲线拟合和分析, 得到了至今被广泛使用的热舒适评价指标——PMV^[4]。PMV综合了人体变量和环境变量6个影响人体热舒适的因素, 是迄今为止最全面的评价热环境的指标。PMV的值 y_{pmv} 为:

$$y_{pmv} = (0.303 e^{-0.036M} + 0.0275) \{ M - W - 3.05[5.75 - 0.007(M - W) - p_a] - 0.0173 M(5.87 - p_a) - 0.0014 M(34 - t_a) - 0.42(M - W - 58) - 3.96 \times 10^{-8} f_{cl} [(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] - f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a) \} \quad (1)$$

式中:

M ——乘客的新陈代谢率, W/m^2 ;

W ——人体所做外部机械功, W/m^2 ;

p_a ——空气中的水蒸气分压力, Pa;

t_a ——空气温度, $^{\circ}C$;

f_{cl} ——着装时人的体表面积与裸露时人的体表面积之比;

t_{cl} ——服装表面温度, $^{\circ}C$;

t_r ——平均辐射温度, $^{\circ}C$;

h_c ——对流传热系数, $W/(m^2 K)$ 。

这就是包括人体、服装、环境三者的 6 个热舒适性的基本影响因素。其中 M 是人体的因素, I_{cl} 是服装热阻的因素, t_a 、 p_a 、 t_r 和 h_c 是环境的因素。由于 h_c 是风速 v 的函数, 所以也可以把 PMV 方程写成:

$$y_{pmv} = f_1(M, I_{cl}, t_a, p_a, t_r, v) \quad (2)$$

y_{pmv} 由引进反映人体热平衡偏离程度的人体热负荷而得出。人体热负荷正值越大, 人就觉得越热; 负值越大, 人就觉得越冷。PMV 通过同一环境下大多数人的感受来评价热环境的舒适程度, 但是人的感受存在个体差异, 因此 PMV 无法完全代表所有人的感觉。对此文献[4]引入预测不满意百分比 PPD(其值记为 y_{ppd}) 来表示人群对环境不满意的百分数, 并用概率分析方法, 给出了 y_{pmv} 与 y_{ppd} 之间的定量关系[4]:

$$y_{ppd} = 100 - 95 \exp[-(0.0353 y_{pmv}^4 + 0.2179 y_{pmv}^2)] \quad (3)$$

y_{pmv} 与 y_{ppd} 之间的关系见图 1。当 $y_{pmv} = 0$ 时, $y_{ppd} = 5\%$ 。这说明即使热环境已经是最佳的状态, 仍然会有 5% 的人对热环境感到不满意。这主要是由于人的生理差异造成的。GB 18049 推荐的舒适要求, 预计 90% 的人出现可接受的热感觉, 即为舒适的热环境。

2 M 与 t_a 关系

PMV 反映了同一环境中大多数人的冷热感觉, 其理论基于人体热负荷, 适用于稳态环境下的热舒适评价。文献[5]首次将 PMV 作为控制目标引入空调控制系统。后续学者也进行了大量的研究。

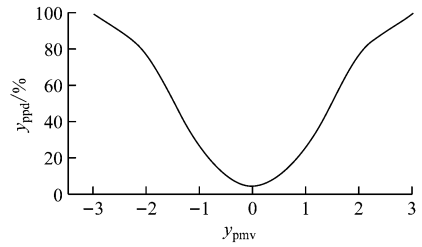


图 1 y_{pmv} 与 y_{ppd} 的关系图

Fig. 1 Diagram of relationship between y_{pmv} and y_{ppd}

文献[6]首次将 PMV 控制引入列车, 根据车厢内外各因素实时计算 PMV 的值。国内众多学者也采用 PMV 来评价地铁热环境舒适性。

根据不同学者对地铁列车的调研测试结果[7-9]以及相关标准[10], 夏季列车内环境相对湿度 $\varphi = 60\%$, $p_a = 1.8 \text{ kPa}$, $v = 0.2 \text{ m/s}$, $I_{cl} = 0.078 \text{ m}^2 K/W$ 。将地铁列车环境参数代入 PMV 方程中, 得到列车内 PMV 关于 M 和 t_a 的关系式 $y_{pmv} = f_2(M, t_a)$:

$$y_{pmv} = (0.303 e^{-0.036M} + 0.0275) \times (0.4833 M + 0.0014 M t_a + 5.96 t_a - 175.83) \quad (4)$$

图 2 及图 3 为不同新陈代谢率乘客在不同温度下的 y_{pmv} 与 y_{ppd} 。

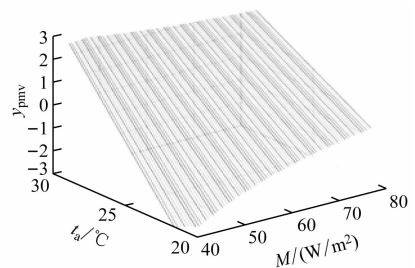


图 2 M 、 t_a 与 y_{pmv} 关系图

Fig. 2 Diagram of relationship between M , t_a and y_{pmv}

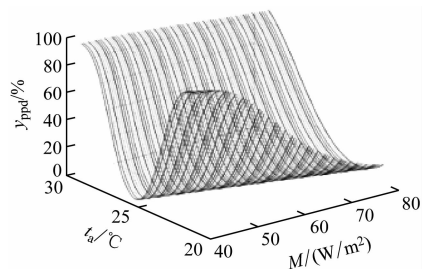


图 3 M 、 t_a 与 y_{ppd} 关系图

Fig. 3 Diagram of relationship between M , t_a and y_{ppd}

$t_a = f_3(M, y_{pmv})$ 。假定此时列车内为最舒适的热环境,令 $y_{pmv} = 0$, 可得到 t_a 与 M 的关系式 $t_a = f_4(M)$, 即:

$$t_a = \frac{175.83 - 0.483\,3\,M}{5.96 + 0.001\,4\,M} \quad (5)$$

如图 4 所示,列车内 M 不同的乘客感到最舒适时所需的 t_a 不同。乘客的 M 越高,其体感最舒适所需的 t_a 越低。

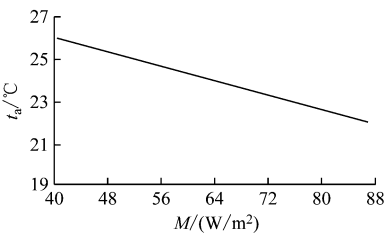


图 4 M 与 t_a 的关系图

Fig. 4 Diagram of relationship between M and t_a

3 M 不同时乘客的最佳热舒适性

人的新陈代谢率受种族、年龄、性别、身体成分、形体、营养状态、疾病、内分泌等因素影响。不同活动条件下的新陈代谢率已有权威的数据可供参考^[11]。成年男子在不同活动强度下的 M 见表 1。 M 因年龄及性别有所差异:随着年龄的增长, M 逐渐降低;此外,女性 M 也低于男性 M ^[12]。受列车运行、人员拥挤及心理因素等影响,列车内乘 1 客的 M 要高于建筑内正常静坐者的 M ^[13]。

根据表 1,对于列车内成年男性等 M 较高的乘客, $M = 70.0\text{ W/m}^2$ 。由于妇女和老人的 M 较成年男子的 M 低 20% 左右,故取 $M = 56.0\text{ W/m}^2$ 。通过 PMV-PPD 方程(式(3)—式(5))计算出不同乘客在 t_a 不同时的 y_{ppd} ,如图 5 所示。

由图 5 可知,成年男性乘客在 $t_a = 23.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时 y_{ppd} 最低,妇女和老人在 $t_a = 24.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时 y_{ppd} 最低。

根据相关问卷调查结果,乘客中男性与女性的比例约为 6:4;按照年龄划分,乘客中有 10% 左右的老人。所以,可能有 20% ~ 50% 的乘客 M 较低。

假设列车内 M 较高的乘客和 M 较低的乘客各占 50%,则当列车内为同一温度 $t_a = 25.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, M 较高乘客 $y_{ppd} = 8.3\%$, M 较低乘客 $y_{ppd} = 5.1\%$,整车的 y_{ppd} 平均值为 6.7%。

列车采用同车不同温的空调设定模式后, M 较高的乘客进入 $t_a = 23.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的强冷车厢, $y_{ppd} = 5.0\%$;

表 1 成年男子在不同活动强度下的 M
Tab.1 M of adult men under different activity intensities

| 活动状态 | $M/(W/m^2)$ |
|--------------------------|-------------|
| 躺着 | 46.0 |
| 放松地坐着 | 58.2 |
| 坐着活动或站着休息(办公室、住处、学校、实验室) | 70.0 |
| 站着,轻微活动(购物、实验室、轻工业) | 93.0 |
| 站着,中等活动(销售员、做家务、机械加工) | 116.0 |
| 2 km/h 步行 | 110.0 |
| 3 km/h 步行 | 140.0 |
| 4 km/h 步行 | 165.0 |
| 5 km/h 步行 | 200.0 |

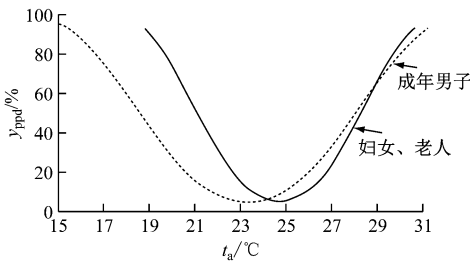


图 5 列车内不同乘客在 t_a 不同时的 y_{ppd}

Fig. 5 y_{ppd} of different passengers at different t_a in the train

M 较低乘客进入 $t_a = 24.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的弱冷车厢, $y_{ppd} = 5.0\%$,整车的 y_{ppd} 平均值为 5.0%。 y_{ppd} 明显降低。

4 热舒适性实例分析

某市地铁列车采用了同车不同温的空调设定模式,其强冷车厢和弱冷车厢的设置有 3 种方案。

方案一:地铁列车设置前 3 节车厢为强冷车厢,后 3 节车厢为弱冷车厢。现场测得强冷车厢内 $t_a = 23.9\text{ }^{\circ}\text{C}$,弱冷车厢内 $t_a = 25.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。假设列车内 M 较高的乘客和 M 较低的乘客各占 50%。 M 较高的乘客进入强冷车厢, M 较低的乘客进入弱冷车厢,计算可得强冷车厢内 $y_{ppd} = 5.7\%$,弱冷车厢内 $y_{ppd} = 6.9\%$,整车的 y_{ppd} 平均值为 6.3%。

方案二:地铁列车设置前 3 节车厢为弱冷车厢,后 3 节车厢为强冷车厢。现场测得强冷车厢内 $t_a = 24.9\text{ }^{\circ}\text{C}$,弱冷车厢内 $t_a = 26.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。假设列车内 M 较高乘客和 M 较低乘客各占 50%, M 较高的乘客进入强冷车厢, M 较低的乘客进入弱冷车厢。计算

可得,强冷车厢内 $y_{\text{ppd}} = 10.1\%$,弱冷车厢内 $y_{\text{ppd}} = 12.2\%$,整车的 y_{ppd} 平均值为 11.2% 。

方案三:地铁列车设置第 1 节和第 6 节车厢为弱冷车厢,中间第 2 节至第 5 节车厢为强冷车厢。现场测得强冷车厢内 $t_a = 24.6\text{ }^{\circ}\text{C}$,弱冷车厢内 $t_a = 26.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。假设列车内 M 较高的乘客占 66% , M 较低的乘客占 34% 。 M 较高的乘客进入强冷车厢, M 较低的乘客进入弱冷车厢,根据 PMV-PPD 方程计算出强冷车厢内 $y_{\text{ppd}} = 8.3\%$,弱冷车厢内 $y_{\text{ppd}} = 18.2\%$,整车的 y_{ppd} 平均值为 11.6% 。

由整车的 y_{ppd} 平均值可以看出,方案一的整车 y_{ppd} 平均值最低,方案二其次,方案三的整车 y_{ppd} 平均值最高。这是由于列车在向前运行时,前端空气会往后跑,冷空气比热空气密度大,不容易向后跑。若前 3 节车厢弱冷,后 3 节车厢强冷,那么地铁运行时热空气全往后窜,结果导致强冷车厢内温度升高,乘客舒适性降低, y_{ppd} 增大。

5 结语

本文通过分析 PMV-PPD 热舒适性指标,得到最舒适热环境下 t_a 与 M 的关系式 $t_a = f(M)$,发现列车内 M 不同的乘客达到最舒适状态时所需的 t_a 不同。乘客的 M 越高,达到最舒适状态所需的 t_a 越低。

列车采取同车不同温的空调设定模式后, M 较高的乘客进入强冷车厢, M 较低的乘客进入弱冷车厢,相比于整列车设置同一温度,乘客的 y_{ppd} 平均值降低。

在强冷车厢和弱冷车厢设置方案中,方案一的整车 y_{ppd} 平均值最低,方案三的整车 y_{ppd} 平均值最高。故方案一即列车前三节设置为强冷车厢,后三节设置为弱冷车厢时最优。

参考文献

- [1] 刘瑞. 地铁车厢空调气流组织评价[J]. 建筑热能通风空调, 2012(4): 73.
LIU Rui. Evaluation of air diffusion in a subway passenger car [J]. Building Energy & Environment, 2012(4): 73.
- [2] 燕成飞, 郑学林, 臧建彬. 地铁列车顶部送风方式及舒适性研究[J]. 制冷与空调, 2019(12): 28.
YAN Chengfei, ZHENG Xuelin, ZANG Jianbin. Study on top air supply modes and comfort for subway train[J]. Refrigeration and Air-Conditioning, 2019(12): 28.
- [3] FANGER P O. Calculation of thermal comfort, introduction of a basic comfort equation [J]. ASHRAE Transactions, 1967, 73 (2): 1.
- [4] FANGER P O. Thermal comfort: analysis and applications in environmental engineering [M]. New York: McGraw-Hill, 1970.
- [5] MACARTHUR W. Humidity and predicted-mean-vote based (PMV-based) comfort control [J]. ASHRAE Transactions, 1986, 92(1): 1.
- [6] FUNAKOSHI S, MATSUO K. PMV-based train air-conditioning control system [J]. ASHRAE Transactions, 1995(1): 423.
- [7] 庄晓芸. 上海地铁车厢空气环境实测调查与数值研究[D]. 上海: 东华大学, 2012.
ZHUANG Xiaoyun. Field measurement and numerical simulation on indoor air environment of Shanghai subway carriage [D]. Shanghai: Donghua University, 2012.
- [8] 郝胜男, 郑学林. 上海地铁车厢气流组织分析[J]. 制冷, 2017(4): 47.
HAO Shengnan, ZHENG Xuelin. Analysis of air distribution in compartment of Shanghai Metro [J]. Refrigeration, 2017 (4): 47.
- [9] 户晶荣. 夏季地铁车厢内气流组织模拟及热舒适性研究 [D]. 郑州: 郑州大学, 2016.
HU Jingrong. Numerical simulation research of air-flow organization and thermal comfort study in summer for subway carriages [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2016.
- [10] ISO. Ergonomics of the thermal environment—analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria; EN ISO 7730—2005 [S]. Geneva: ISO, 2005.
- [11] 国家质量技术监督局. 人类工效学 代谢产热量的测定: GB/T 18048—2000 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.
State Bureau of Quality and Technical Supervision of the People's Republic of China. Ergonomics—determination of metabolic heat production: GB/T 18048—2000 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2004.
- [12] 张佳月, 田征文, 谭红专. 人类基础代谢率测量方法的研究进展 [J]. 中南大学学报(医学版), 2018(7): 805.
ZHANG Jiayue, TIAN Zhengwen, TAN Hongzhuan. Research progress in measurement of human basal metabolic rate [J]. Journal of Central South University (Medical Science), 2018 (7): 805.
- [13] 徐科飞, 夏积玉, 王刚, 等. 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(3): 79.
XU Kefei, XIA Jiyu, WANG Gang, et al. Determination of passenger status and parameters in thermal comfort evaluation of metro cars [J]. Journal of Qingdao University of Technology, 2018 (3): 79.

(收稿日期: 2020-07-31)