

地铁强冷和弱冷车厢的人体舒适率分析

陈 阳¹ 臧建彬^{2*} 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. 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 目的:在夏季高温天气,车厢内的温度冷热不均成为了地铁乘客反映最多的问题,因此有必要研究地铁车厢环境温度对人体舒适率的影响问题。方法:对 7 条地铁线路强冷和弱冷车厢的温度及湿度平均值进行实测分析;建立车厢模型,并明确模型的边界条件;根据地铁车厢环境温度的实测数据,采用计算流体力学的方法,针对强代谢率乘客和弱代谢率乘客在不同环境温度下的 PMV(预测平均评价)热舒适性评价指标,分析地铁车厢内 4 种典型截面处的人体舒适率。结果及结论:强冷车厢内的温度约为 23 ℃,弱冷车厢内的温度约为 26 ℃,强冷车厢和弱冷车厢的温度差约为 3 ℃,且同一节车厢内的温度也有 2~3 ℃ 的上下浮动;强代谢率乘客在 20.7~22.0 ℃ 温度范围内的舒适率较高,在 22.0 ℃ 时的舒适率达到最高,车内舒适率为 41%。强代谢率乘客在 20.7~22.0 ℃ 温度范围内的车内舒适率较高;弱代谢率乘客在 23.0~24.3 ℃ 温度范围内的舒适率较高,在 24.3 ℃ 时的舒适率达到最高,车内舒适率为 42%。

关键词 地铁;强冷车厢;弱冷车厢;人体舒适率

中图分类号 U270.38+3

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.09.037

Analysis of Human Comfort Level in Strong and Mild Air-conditioned Metro Passenger Compartments

CHEN Yang, ZANG Jianbin, WANG Tao, CHEN Guangxu

Abstract Objective: In hot summer weather, uneven temperature distribution inside metro passenger compartments is a major issue reflected by passengers. Therefore, it is necessary to study the impact of metro compartment environmental temperature on human comfort level. Method: The average temperature and humidity values of strong and mild air-conditioned compartments (hereinafter referred to as HL-cool and LOD-cool) on 7 metro lines are measured and analyzed. Compartment models are established with defined boundary conditions. Based on the field-measured data of metro compartment envi-

ronmental temperature, CFD (computational fluid dynamics) method is used to analyze the human comfort level at four typical sections in metro compartments for the PMV (predicted mean value) thermal comfort evaluation index of passengers with high and low metabolic rates under different environmental temperature conditions. Result & Conclusion: The temperature inside HL-cool compartment is approximately 23 ℃ while it is approximately 26 ℃ in LOD-cool compartments. The temperature difference between the two compartments is around 3 ℃, and the temperature in the same compartment also fluctuates up and down at 2~3 ℃. The comfort rate of passengers with high metabolic rate have a higher comfort level within the temperature range of 20.7~22.0 ℃, with the highest comfort level reached at 22.0 ℃, resulting in an overall comfort level of 41% in compartment. For passengers with low metabolic, the higher and highest comfort levels are 23.0~24.3 ℃ and 24.3 ℃, resulting in an overall comfort level of 42% in compartment.

Key words metro; strong air-conditioned (HL-cool) compartment; mild air-conditioned (LOD-cool) compartment; human comfort level

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

地铁以其占地少、运量大、运行速度快、环境污染小和乘坐方便舒适等特点,已成为各大城市中人们出行、上班最理想的交通方式。同时,地铁的日常运营也表现出许多不足之处,如车厢内的温度过高或过低,乘客明显感觉到很冷或很热等情况时有发生,尤其是在夏季高温天气,车厢内的温度冷热不均成为了地铁乘客反映最多的问题^[1]。在实际运营中,由于不同乘客的体感温度和所站位置有所不同,乘客对地铁温度的感受也不尽相同。针对此

* 通信作者

现象,在2019年6月,北京地铁6号线车厢空调采取“同车不同温”的设定模式,在地铁车厢内新设了冷热区,乘客可按需选择车厢乘车。

近年来,已有学者对地铁乘客的乘坐舒适性进行了研究。文献[2]对地铁空调系统及客室内流场数值进行了分析,获得了客室流场温度与速度的分布规律。文献[3]对地铁列车的气流进行了模拟,并用ADPI(空气分布特性指标)对乘客舒适性进行了评价。但以上研究中地铁车厢的空调送风温度均相同,未涉及不同空调送风温度问题,且未考虑乘客新陈代谢率与热环境人体舒适率之间的关系。鉴于此,本文对地铁强冷和弱冷车厢的环境温度进行了实车测试,在实测数据的基础上对地铁车厢进行建模和热环境仿真计算,并以车厢内典型截面为

例,分析强代谢率乘客与弱代谢率乘客在不同环境温度内的PMV(预测平均评价)热舒适性指标。本文研究可为地铁日常运营中提高乘客舒适度提供参考依据。

1 地铁车厢环境温度实测与分析

夏季工况下,西安地铁3号线及4号线,长沙地铁1号线、2号线、3号线、4号线及5号线均实行“同车不同温”的地铁车厢温度控制方案。对这几条线路的地铁车厢温度进行现场测量,对比分析这7条线路强冷和弱冷车厢的环境温度,如表1所示。所用测试仪器为Testo 175H1 温湿度记录仪,其温度量程为-20~60℃,测量精度为0.1℃;湿度量程为1%RH,测量精度为1%RH。

表1 7条地铁线路强冷和弱冷车厢温度对比

Tab.1 Comparison of average temperature between HL-cool and LOD-cool compartments of 7 metro lines							
城市名称	线路名称	强冷车厢温度/℃			弱冷车厢温度/℃		
		最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
西安	3号线	25.6	22.1	25.3	28.2	24.8	26.6
	4号线	24.6	22.4	24.3	26.8	24.5	26.4
	1号线	24.7	22.6	23.7	26.8	24.4	25.2
	2号线	25.6	22.8	24.3	27.2	24.7	25.7
长沙	3号线	25.3	22.4	22.9	26.6	23.8	24.7
	4号线	24.5	22.6	23.0	27.3	24.3	25.4
	5号线	24.9	22.0	23.8	26.7	24.4	25.8

由表1可知,强冷车厢内的温度在23℃左右,弱冷车厢内的温度在26℃左右,同一地铁线路的弱冷车厢与强冷车厢的温度差约为3℃,其中强冷车厢和弱冷车厢内的温度最大值与最小值均相差约2~3℃。这说明地铁车厢内的环境温度有着较大程度的变化,不仅强冷车厢和弱冷车厢的温度相差约3℃,同一节车厢内的环境温度也有2~3℃左右的上下浮动。

2 车厢模型及边界条件

2.1 车厢模型

对地铁列车车厢进行建模,车厢模型主要分为座椅区和门区。车厢中部长为4.2m,宽为2.7m,车厢地板距离客室顶板2.1m。车厢内部设有2排座椅,位于座椅区左右两侧,每排座椅限坐6人。以AW2(满座+6人/m²,额定载荷)工况为例进行模拟计算,客室内人员密度为站立区6人/m²、座椅6

人/排。三维车厢模型示意图如图1所示。

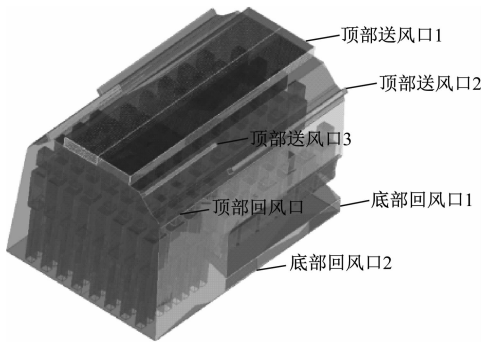


图1 三维车厢模型示意图

Fig.1 Diagram of three-dimensional compartment model

采用ICEM软件中的非结构四面体网格对流场区域进行划分,最大网格边长约为150.0mm,最小网格边长约为2.5mm。模拟时,车厢模型划分了两种数量的网格模型,分别为 9×10^6 个网格和 2×10^7 个网格。通过计算可知,两种网格数量均符合模拟

计算要求。在保证计算精度的前提下,同时考虑计算周期,最终选取的网格数量为 9×10^6 个。

2.2 模型假设

文献研究表明,采用 RNG(重整化群) $k-\varepsilon$ 湍流模型与SIMPLE 算法的模拟结果与车内实际热环境具有较高的吻合,能够满足模拟的准确性^[4-5]。根据 SIMPLE 算法作如下假设:①车厢内空气为不可压缩气体,且符合 Boussinesq 假设;②车厢内的气体流动为稳态湍流;③流场内流体的湍流黏性各向同性,且具有高雷诺数;④不考虑漏风影响,车厢内气密性良好。

2.3 边界条件

- 1) 以送风口作为计算入口边界,风速设定为 1.173 m/s,速度方向垂直于入口边界面。
- 2) 以回风口作为计算出口边界,回风口的压力设定为 0,外界压强为一个标准大气压。
- 3) 第 1 个工况设置送风温度为 16 ℃,之后每个工况的送风温度均比前 1 个工况增加 1 ℃。
- 4) 车厢墙壁的传热系数为 2.4 W/(m²·K),在模拟计算中采用第二类边界条件,设置边界条件热流密度,车厢两端截面设置为绝热面。
- 5) 座椅下方回风孔板采用多孔跳跃模型,设置黏性阻力系数为 1.12×10^{-4} ,惯性阻力系数为 14.05。

3 车厢内典型截面处的人体舒适度分析

3.1 舒适性指标

PMV 指标表征人体热反应的评价指标,即 PMV 正值越大,人体就感觉越热;PMV 负值越大,人体就感觉越冷。PMV 热感觉标尺如表 2 所示。为了研究车内环境舒适性分布情况,在车厢典型位置建立剖切平面,通过分析该平面上的速度和温度分布情况,研究整个地铁车厢内部的流场分布情况。对于人体而言,对于冷热感觉最为敏感的部位是人体头部。为直观而有针对性地对客室 PMV 情况进行分析,根据 UIC 553:2004《客车的通风、采暖和空调》的规定,选取距车厢底部 1.1 m 高度处的列车截面(该截面对应坐姿乘客头部位置),以及距车厢底部 1.7 m 高度处的列车截面(该截面对应站姿乘客头部位置)进行研究。

3.2 乘客新陈代谢率

新陈代谢率对人体热感觉有较大程度的影响。

表 2 PMV 热感觉标尺

Tab.2 PMV thermal sensing scale

热感觉	PMV 值	热感觉	PMV 值
热	+3	稍凉	-1
暖	+2	凉	-2
稍暖	+1	冷	-3
适中	0		

若人体新陈代谢率高,则人体达到最舒适状态时所需的温度就较低;若人体新陈代谢率低,则人体达到最舒适状态时所需的温度就较高。人体的新陈代谢率受到种族、年龄、性别、身体成分、形体、营养状态、疾病和内分泌等因素的影响。随着年龄的增长。人体的新陈代谢率逐渐降低,同时女性的新陈代谢率要低于男性的新陈代谢率。由于列车运动、人员拥挤及各种心理因素的影响,列车内乘客的新陈代谢率要高于建筑内正常静坐者的新陈代谢率。模拟时,列车内成年男性乘客的新陈代谢率 M 取为 70 W/m²,记为强代谢率乘客;妇女和老人的新陈代谢率取为 56 W/m²,记为弱代谢率乘客。

3.3 数值模拟结果分析

通过模拟获得的各工况下 4 个典型位置处的温度如表 3 所示,其中:底部回风口的风量占总回风量的 82%;顶部回风口的回风量占总回风量的 18%。

表 3 各工况下 4 个典型位置处的温度

Tab.3 Temperature at four typical positions under various working conditions

工况	顶部回风温度/℃	底部回风温度/℃	1.1 m 高度处温度/℃	1.7 m 高度处温度/℃
1	17.5	21.6	22.6	22.3
2	18.4	22.2	23.4	23.1
3	19.8	23.0	23.9	23.7
4	20.6	23.8	24.8	24.6
5	21.3	24.5	25.5	25.2
6	22.3	25.5	26.2	25.9
7	23.3	26.1	27.0	26.7
8	24.2	26.7	27.6	27.5
9	25.1	27.5	28.3	28.2

通过 Fluent 软件计算可以获得 1.1 m 高度截面与 1.7 m 高度截面下车厢环境的 PMV 值。2 种新陈代谢率下,选取 4 种车厢环境 PMV 分布情况浮动较大的典型工况进行分析,如图 2 所示。根据 GB/T 18049—2020《中等热环境 PMV 和 PPD 指数

的测定及热舒适条件的规定》推荐的舒适要求, PMV 处于 $-0.5 \sim 0.5$ 的热环境属于舒适的热环境。

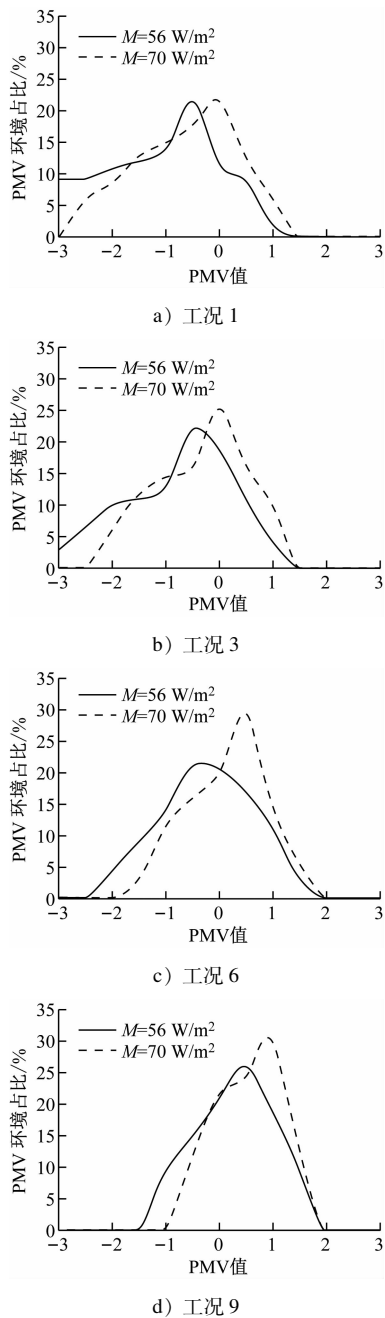


图2 2种新陈代谢率下4种典型工况的车厢环境PMV分布情况

Fig. 2 PMV distribution in compartment environment in 4 typical working conditions corresponding to 2 metabolic rate conditions

由图2 a)可以知道:环境中的PMV主要处于 $-1.5 \sim 0.5$,此时强代谢率乘客与弱代谢率乘客均感觉偏凉;对于强代谢率乘客而言,该环境中

PMV为 $-0.5 \sim 0$ 的比例为17%,PMV为 $0 \sim 0.5$ 的比例为22%,车内舒适率为39%;对于弱代谢率乘客而言,该环境中PMV为 $-0.5 \sim 0$ 的比例为22%,PMV为 $0 \sim 0.5$ 的比例为11%,车内舒适率为33%。

随着送风温度的提高,车内环境温度逐渐升高,环境中的PMV在 $-0.5 \sim 0.5$ 所占的比例也越来越高。由图2 b)可知:工况3下,强代谢率乘客的舒适感最佳,该环境中的PMV为 $-0.5 \sim 0$ 的比例为16%,PMV为 $0 \sim 0.5$ 的比例为25%,车内舒适率为41%,达到最高值;对于弱代谢率乘客而言,该环境中的PMV为 $-0.5 \sim 0$ 的比例为20%,PMV为 $0 \sim 0.5$ 的比例为18%,车内舒适率为38%,相比工况1有所提高,但还未达到最高值。

由图2 c)可知:工况6下,弱代谢率乘客的舒适感最佳,该环境中的PMV为 $-0.5 \sim 0$ 的比例为21%,PMV为 $0 \sim 0.5$ 的比例为21%,车内舒适率为42%,达到最高值;强代谢率乘客的舒适率有所下降,该环境中的PMV为 $-0.5 \sim 0$ 的比例为18%,PMV为 $0 \sim 0.5$ 的比例为18%,车内舒适率为36%。

由图2 d)可知:工况9的车内环境温度较高,该环境中的PMV主要为 $0.5 \sim 1.5$,此时强代谢率的乘客与弱代谢率的乘客均感觉偏暖,强代谢率乘客和弱代谢率乘客的车内舒适率均有所降低。

分析每个工况的车内舒适率与回风口温度(以回风口温度表征车厢内环境温度)之间的关系,可以获得强代谢率乘客和弱代谢率乘客在不同车内温度下的车内舒适率情况,如图3所示。

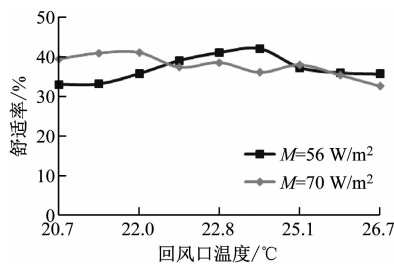


图3 强代谢率和弱代谢率乘客在不同回风口温度下的车内舒适率

Fig. 3 Comfort level of passengers with high and low metabolic rates under different recirculated temperature conditions

由图3可知:①当回风口温度为 $20.7 \sim 22.0^{\circ}\text{C}$ 时,强代谢率乘客的车内舒适率较高;当回风口温

度为 22.0℃时,车内强代谢率乘客的舒适率达到最高值,此时车内舒适率为 41%。随着回风口温度的升高,强代谢率乘客的车内舒适率开始下降。②当回风口温度为 23.0~24.3℃时,弱代谢率乘客的车内舒适率较高;当回风口温度为 24.3℃时,车内弱代谢率乘客的舒适率达到最高值,此时车内舒适率为 42%。

4 结语

本文基于实车测试获得了地铁强冷和弱冷车厢的温度分布规律。强冷车厢内的温度约为 23℃,弱冷车厢内的温度约为 26℃,强冷和弱冷车厢的温度相差约为 3℃,且同一节车厢内的温度也有 2~3℃的上下浮动。通过数值模拟设定不同空调送风温度,分析地铁列车在夏季 AW2 工况下乘客的舒适率情况。模拟结果表明,强代谢率乘客在 20.7~22.0℃温度范围内的舒适率较高,在 22.0℃时的舒适率达到最高,车内舒适率为 41%。随着车内温度的升高,强代谢率乘客的舒适率开始下降。弱代谢率乘客在 23.0~24.3℃温度范围内的舒适率较高,在 24.3℃的舒适率达到最高,车内舒适率为 42%。本文针对不同新陈代谢率的乘客,分别研究了其在强冷和弱冷车厢内的舒适率情况,弥补了强冷和弱冷车厢空调温度设定经验的不足,可为强冷和弱冷车厢的空调温度设定提供借鉴与参考。

参考文献

- [1] 张倩,臧建彬,王颖,等. 地铁列车热环境实测分析与舒适度评价[J]. 制冷技术, 2016, 36(4): 52.
ZHANG Qian, ZANG Jianbin, WANG Ying, et al. Measurement analysis and comfort assessment of metro thermal environment[J]. Chinese Journal of Refrigeration Technology, 2016, 36(4): 52.
- [2] 王东屏,张泽云,韩璐,等. A 型地铁空调系统及客室内流场数值分析[J]. 计算机辅助工程, 2014, 23(6): 22.
WANG Dongping, ZHANG Zeyun, HAN Lu, et al. Numerical simulation on air conditioning system and flow field of passenger compartment of type-A subway[J]. Computer Aided Engineering, 2014, 23(6): 22.
- [3] 柳禹羿. 城市 B 型地铁车辆气流模拟与舒适性评价[J]. 低温建筑技术, 2018, 40(7): 138.
LIU Yuyi. Airflow simulation and comfort evaluation of subway vehicle of city B-type[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2018, 40(7): 138.
- [4] 莫志姣,杨易,邓峰. 车用空调风口布置 CFD 数值仿真研究[J]. 建筑热能通风空调, 2008, 27(1): 63.
MO Zhijiao, YANG Yi, DENG Feng. Research on numerical simulation of outlet position arrangement of air-condition saloon car[J]. Building Energy & Environment, 2008, 27(1): 63.
- [5] 王芳,臧建彬,于佳,等. 高速列车客室内部流场计算流体力学数值模拟[J]. 制冷空调与电力机械, 2011, 32(1): 45.
WANG Fang, ZANG Jianbin, YU Jia, et al. Numerical simulation of inner flow for high-speed train compartment using computational fluid dynamics[J]. Refrigeration Air Conditioning & Electric Power Machinery, 2011, 32(1): 45.

(收稿日期:2021-04-14)

(上接第 203 页)

- [2] 赵影,裴鹏鹏,杜乃成. 不平衡系统下无功补偿的策略研究[J]. 电工电能新技术, 2014, 33(1): 30.
ZHAO Ying, PEI Pengpeng, DU Naicheng. Research of control strategy of static var generator in unbalanced system[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2014, 33(1): 30.
- [3] 张喜海. 利用中压能馈装置分散补偿无功的工程应用分析[J]. 电气化铁道, 2018, 29(3): 51.
ZHANG Xihai. Engineering application analysis of decentralized reactive power compensation by medium voltage energy feedback device[J]. Electric Railway, 2018, 29(3): 51.
- [4] 张戢,刘炜,谢文君,等. 基于逆变回馈装置的城市轨道交通

分布式无功补偿方案研究[J]. 电工电能新技术, 2020, 39(8): 75.

ZHANG Jian, LIU Wei, XIE Wenjun, et al. Research on distributed reactive power compensation scheme of urban rail based on inverter feedback device[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2020, 39(8): 75.

- [5] 刘炜,张扬鑫,张戢,等. 考虑牵引所多运行状态的城轨交流供电计算[J]. 西南交通大学学报, 2020, 55(6): 1163.
LIU Wei, ZHANG Yangxin, ZHANG Jian, et al. Calculation of urban rail AC/DC power supply with traction substation in multi-operation modes[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2020, 55(6): 1163.

(收稿日期:2021-06-29)