

高温高湿地区地铁车厢热环境实测与舒适性分析*

李 丹 吴 婧

(福建理工大学生态环境与城市建设学院, 350118, 福州)

摘 要 [目的] 为了对高温高湿地区的地铁车厢热环境进行改善及实现低碳节能目标,有必要对地铁车厢热环境的现状以及舒适性进行研究。[方法] 对春秋过渡季、夏季、冬季福州地铁 2 号线车厢内的热环境参数进行现场测试,采用问卷调查获得车厢内乘客热舒适评价的有效问卷 1 027 份,分析不同群体热感觉之间的差异特性,研究不同载客量和不同天气情况下车厢内乘客的热舒适性区别,计算车厢的热中性温度。[结果及结论] 乘客的主观评价与车厢实际热环境参数存在差异。夏季的热中性温度为 25.11℃,高于车厢实际平均温度。冬季热中性温度为 11.67℃,低于车厢实际平均温度。说明夏季车厢偏凉,应适当提高空调送风温度,冬季车厢偏热,应适当降低空调送风温度。

关键词 地铁车厢; 热环境; 热舒适; 高温高湿地区; 热中性温度

中图分类号 U270.38+3

DOI:10.16037/j.1007-869x.2025.04.016

Field Test on Thermal Environment and Comfort Analysis of Subway Compartment in High Temperature and High Humidity Areas

LI Dan, WU Jing

(College of Ecological Environment and Urban Construction, Fujian University of Technology, 350118, Fuzhou, China)

Abstract [Objective] In order to improve the thermal environment of subway compartment in high temperature and humidity areas and achieve low-carbon energy-saving goals, it is necessary to study the current situation and comfort of subway compartment thermal environment. [Method] Field tests are conducted on the compartment thermal environment parameters of Fuzhou Metro Line 2 in the spring and autumn transition seasons, summer, and winter. Meanwhile, 1 027 valid questionnaires on thermal comfort evaluation of compartment passengers are obtained by questionnaire survey. Thermal sensation differences among different groups are analyzed. Thermal comfort differences of compartment passengers under different passenger capacities and weather conditions are studied, and the compartment thermal neutral temperature is calculated.

[Result & Conclusion] There are differences between the subjective passenger evaluation and the actual compartment thermal environment parameters. The thermal neutral temperature 25.11℃ in summer is higher than the average actual compartment temperature, and thermal neutral temperature 11.67℃ in winter is lower than the average actual compartment temperature, indicating that the compartment is too cool in summer and the set temperature of air conditioning should be appropriately increased, while compartment is too warm in winter and the set temperature of air conditioning should be appropriately reduced.

Key words subway compartment; thermal environment; thermal comfort; high temperature and high humidity areas; thermal neutral temperature

0 引言

温室气体排放导致气候变化,是人类面临的全球性问题。国务院印发的《2030 年前碳排放达峰行动方案》指出,大力推动能源技术革命,加快落实主要能源碳排放行业达峰,节能降耗是实现“碳达峰、碳中和”目标的重要战略^[1]。地铁车厢热环境关乎人们的健康与舒适,也是交通领域实现低碳节能的主要载体之一。

现有的地铁设计标准不能很好地满足地铁车厢内乘客的热舒适性需求。诸多学者对乘客热舒适问题展开研究。文献[2-6]通过实地调研,获得地铁车厢热环境现状及乘客对实际热环境的主观感受,进而对车厢热舒适进行评价,探讨乘客的热中性温度、适应特性,以及载客量、乘客年龄、乘客性别等不同因素对乘客热舒适的影响。文献[7-10]对地铁车厢内空调运行时气流组织的合理性研究,通过数值模拟分析了车厢内不同送风参数及不同出/回风口位置等对车厢内乘客热舒适的影响。

然而,乘客热舒适研究所涉及地区多聚焦在西

* 福建省自然科学基金面上项目(2019J01775)

安或长春等严寒地区,以及北京及上海等发达地区。高温高湿地区的乘客热舒适研究尚属空白。

福州地区为典型的高温高湿地区。福州市位于我国东南沿海地区,属于亚热带季风气候,夏热冬暖。福州市区为盆地地形,易形成城市热岛效应,导致其夏季中午气温通常高达 36°C 以上。福州地铁2号线(以下简称“2号线”)位于福州主城区范围内,为城市轨道交通东西向主轴骨干线。本文以2号线为案例,采用现场实测和问卷调查的方式收集相关数据,并对车厢内的乘客热舒适进行研究,以期在高温高湿地区的地铁车厢热环境的设计及改善提供参考。

1 数据收集方案

本研究主要通过现场实测与问卷调查的方式收集相关数据。从2号线的始发站到终点站,对往返乘客进行问卷调查,并同步对热环境进行现场实测。数据收集时间为:冬季(2021年12月—2022年1月)、春季(2022年3—5月)、夏季(2022年7—8月)、秋季(2022年9—10月)。因地铁在夏季开启制冷系统,在冬季开启采暖系统,在春秋季节均只

开启通风系统,故本文将春季和秋季的数据合并为过渡季数据。

1.1 现场实测

现场实测内容为:列车平稳运行后,空调出风口温湿度、影响乘客热舒适车厢内的热环境参数(温度、相对湿度、风速),以及地铁口室外的热环境。

2号线列车为6节编组的地铁B型车,每节车厢长 19.0 m ,宽 2.8 m ,净高 2.1 m 。车厢内测点分散布置,位于距车厢地面 1.1 m 高处。车厢内测点布置如图1所示。

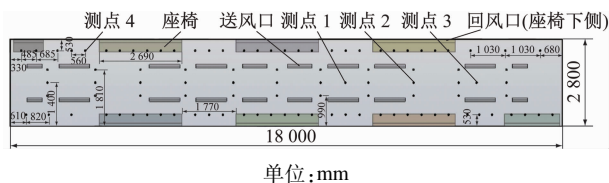


图1 车厢内测点布置示意图

Fig. 1 Measuring points layout in the compartment

环境测量所用仪器为温湿度测量仪和叶轮风速仪,相关参数见表1。

表1 环境测量仪器参数

Tab. 1 Environmental measuring instrument parameters

仪器名称	型号	测试项目	量程	测量精度
温湿度测量仪	Testo 435-2	温度	$-20 \sim 70^{\circ}\text{C}$	$\pm 0.3^{\circ}\text{C}$
		湿度	$0 \sim 100\%$	$\pm 2\%$
叶轮风速仪	Testo 410-2	风速	$0.4 \sim 20.0\text{ m/s}$	$\pm (0.2\text{ m/s} + 2\% \text{ 测量值})$

1.2 问卷调查

乘客问卷调查内容包含乘客基本信息、当前感受、期望,以及地铁环境评价的统计。问卷调查采用分级投票的形式。其中:热感觉采用ASHRAE七级分度指标^[11],湿感觉及吹风感采用七级投票标度,如表2所示;期待温度、期待湿度及期待风速采用五级投票标度,如表3所示。

2 试验结果及分析

2.1 热环境参数统计

2.1.1 福州室外热环境统计

选取最具代表高温高湿地区的福州夏季室外温湿度的测量值为研究对象。于2022年7月23日至2022年8月25日,每日12:00—14:00测量福州地铁2号线董屿·福建师大站(以下简称“董屿

表2 热感觉、湿感觉及吹风感投票标度

Tab. 2 Vote scales for thermal sensation, humidity perception and draft perception

项目	不同评分值对应的感觉描述						
	-3	-2	-1	0	1	2	3
热感觉	冷	凉	稍凉	适中	稍暖	暖	热
湿感觉	很干	干	稍干	适中	有点潮	潮	很潮
吹风感	很闷	闷	稍闷	适中	微风感	气流感	气流感很强

站”)外的空气温湿度,并统计当日温湿度均值,统计结果如图2所示。

2.1.2 地铁热环境参数统计

根据现场实测结果:地铁口夏季室外温度为 $33.0 \sim 47.4^{\circ}\text{C}$,车厢开启制冷系统;地铁口冬季室外温度为 $9.1 \sim 19.8^{\circ}\text{C}$,车厢开启供暖系统;过渡季所测得的地铁口的室外温度范围为 $21.5 \sim 25.2^{\circ}\text{C}$,

表 3 期待温度、期待湿度、期待风速投票标度
Tab.3 Vote scales for expected temperature sensation,
humidity perception and draft perception

项目	不同评分值对应的感觉描述				
	-2	-1	0	1	2
期待温度	凉一些	凉一点	不变	暖一点	暖一些
期待湿度	干一些	干一点	不变	湿一些	湿一些
期待风速	小一些	小一点	不变	大一点	大一些

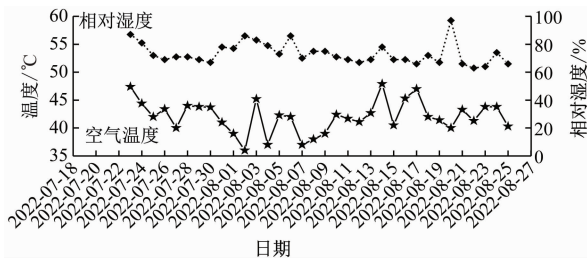


图 2 董屿站外空气温湿度统计结果

Fig.2 Statistics on air temperature and humidity outside
Dongyu Station

地铁车厢只开启通风系统。

按时段与季节统计车厢内的温度及湿度,结果如表 4 及表 5 所示。

表 4 不同时段不同季节的车厢内温度统计结果
Tab.4 Statistics on compartment temperature in different
periods and seasons

时段	季节	温度/℃		
		平均值	最小值	最大值
高峰时段	夏季	23.9	23.0	24.7
	过渡季	24.9	23.0	26.5
	冬季	21.2	18.3	23.7
非高峰时段	夏季	23.2	22.6	23.8
	过渡季	24.1	22.6	25.9
	冬季	20.5	19.8	21.4

注:高峰时段指 07:00—09:00 及 17:00—19:00,其他时间段为非高峰时段。

由表 4 及表 5 可见,与非高峰时段相比,高峰时段所有季节的地铁车厢内温度平均值和相对湿度平均值均更高。这说明人员密度会影响地铁车厢的热环境参数。

由于我国地铁相关设计标准尚没有针对车厢内热环境的明确规定,故地铁车厢内的热环境控制基本参照 UIC 553—2004 *Heating ventilation and air-conditioning in coaches*^[12]。UIC 553—2004 标准

表 5 不同时段不同季节的车厢内相对湿度统计结果
Tab.5 Statistics on compartment relative humidity in
different periods and seasons

时段	季节	相对湿度/%		
		平均值	最小值	最大值
高峰时段	夏季	74.50	71.80	77.20
	过渡季	65.30	51.50	84.30
	冬季	50.50	42.40	60.40
非高峰时段	夏季	74.10	62.10	82.90
	过渡季	64.90	57.70	80.60
	冬季	48.20	39.10	57.20

对车厢内相对湿度规定:车厢内温度须为 20 ~ 27 ℃,相对湿度须为 30% ~ 65%。进一步分析统计结果可知:

1) 2 号线车厢内的温度符合 UIC 553—2004 标准。

2) 冬季车厢内的相对湿度符合 UIC 553—2004 标准;夏季车厢内的相对湿度大多高于 65%,超过 UIC 553—2004 标准的要求;过渡季大部分时间车厢内的相对湿度为 40% ~ 70%,过渡季雨天时车厢内的相对湿度为 80% 左右。

由此可以看出,福州地铁车厢内的微气候会受到室外高温高湿气候的影响。

2.2 调查问卷统计

2.2.1 基本信息统计

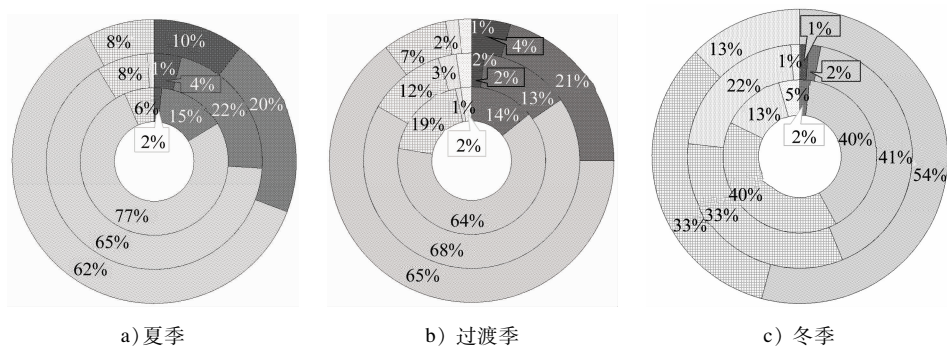
调查问卷均是随机抽样调查,共得到 1 027 份有效样本,其中夏季样本数 310 份(占 30.19%),过渡季样本数 424 份(占 41.29%),冬季样本数 293 份(占 28.52%)。

2.2.2 不同年龄乘客的热感觉

按年龄,将调查对象划分为少年(10 ~ 20 岁)、青壮年(21 ~ 40 岁)和中老年(大于 40 岁)等 3 个年龄层。不同季节各年龄层乘客的热感觉投票分布环形图,如图 3 所示。

由图 3 可以看出,每个季节的各年龄层乘客热感觉各评分值的投票分布情况较为相似:夏季各年龄层的乘客中,认为偏冷(评分值为 -3 ~ -1)的占比远远大于认为偏热的(评分值为 1 ~ 3)占比;冬季各年龄层的乘客中,认为偏暖(评分值为 1 ~ 3)的占比远远大于认为偏冷的(评分值为 -3 ~ -1)占比;超过一半的少年和青壮年认为车厢偏暖。各季节各年龄层乘客的 MTS(热感觉评分平均值)见表 6。

由表 6 可见,少年的 MTS 最高,其次是青壮年



a) 夏季

b) 过渡季

c) 冬季

注: 内环、中环、外环分别表示少年、青壮年、中老年; ■表示评分值为2; ■表示评分值为1; ■表示评分值为0; ■表示评分值为1; ■表示评分值为2; ■表示评分值为3; 图中数据为投票百分比。

图3 不同季节各年龄层乘客的热感觉投票分布环形图

Fig. 3 Distribution donut chart of all ages passenger thermal sensation vote in different seasons

表6 不同年龄层乘客的热感觉评分平均值

Tab.6 Passenger MTS (mean thermal sensation) of different ages

年龄层	热感觉评分平均值		
	夏季	过渡季	冬季
少年	-0.115	0.141	0.761
青壮年	-0.232	0.066	0.729
中老年	-0.400	-0.147	0.583

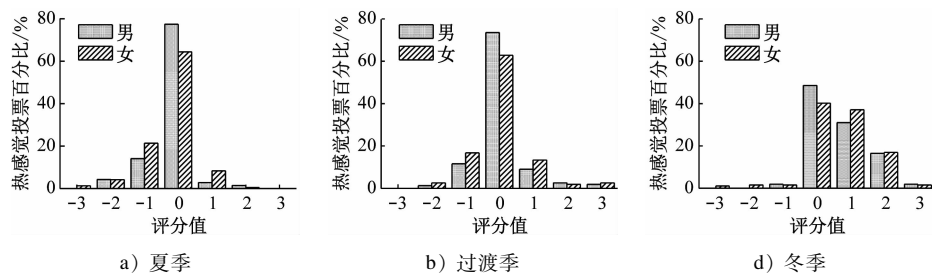
的 MTS, 中老年乘客的 MTS 最低。由此可见, 中老年人喜好更高的环境温度。经分析, 这可能是各年

龄段乘客的身体条件及生活习惯不同导致的感知差异。

2.2.3 不同性别乘客的热感觉

为了更直观地体现不同性别乘客的热感觉差异, 本文统计不同季节不同性别乘客热感觉各评分值的投票分布情况, 如图4所示。

由图4可以看出, 男性乘客和女性乘客在不同季节的热感觉投票分布规律相似: 夏季评分值集中为-1和0, 过渡季评分值集中为-1~1之间, 在冬季评分值集中为0~2。



a) 夏季

b) 过渡季

d) 冬季

图4 不同季节不同性别乘客热感觉投票分布情况

Fig. 4 Distribution of different genders passenger thermal sensation vote in different seasons

计算 MTS 可得, 夏季男性 MTS 为 -0.169, 夏季女性 MTS 为 -0.243, 过渡季男性 MTS 为 0.058, 过渡季女性 MTS 为 0.030; 冬季男性 MTS 为 0.683, 冬季女性 MTS 为 0.677。由此可见, 各季节男性 MTS 均略高于女性 MTS, 说明对于相同车厢温度, 女性比男性感觉更冷一点。各季节女性认为适中(评分值为0)的比例比男性小, 说明女性对温度更敏感。

2.2.4 不同车厢人数时的乘客热感觉

统计调查问卷的数据可得, 夏季、过渡季和冬季不同载客量时的乘客热感觉评价占比如表7

所示。

由表7可见: 在夏季及过渡季, 随着车厢人数的不断增加, 认为偏热的乘客比例逐渐增大, 认为偏冷的乘客比例逐渐减小; 在夏季, 认为偏冷的乘客比例超过认为偏热的乘客比例, 说明车厢整体感觉是偏冷的; 在冬季, 车厢内乘客认为偏暖的乘客占比很大, 而且随着车厢人数的增加, 认为偏暖的乘客比例稍有上升, 说明冬季车厢内环境偏热。此外, 夏季、过渡季及冬季的高峰时段, 认为偏热的乘客比例均高于非高峰时段。

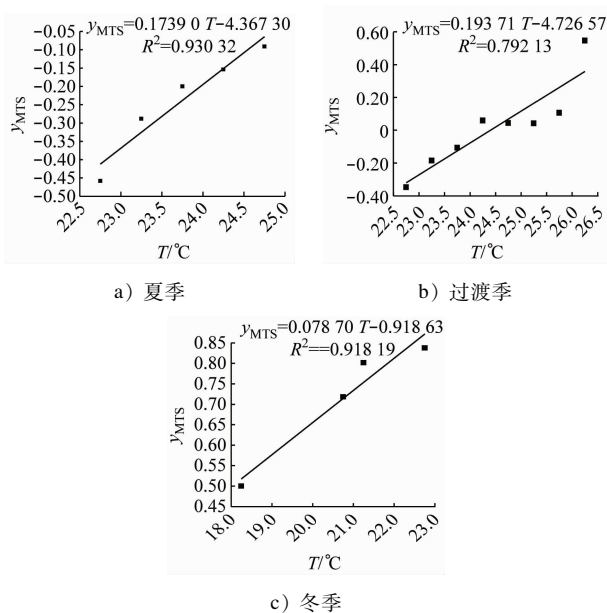
表 7 各季节不同载客量时的乘客热感觉评价占比

Tab. 7 Passenger thermal sensation vote percentage with different passenger capacity in each season

季节	热感觉	不同载客量时的热感觉占比/%		
		1 ~ <60 人	60 ~ <100 人	≥100 人
夏季	偏冷	28	21	14
	适中	65	69	76
	偏热	7	10	10
过渡季	偏冷	21	19	7
	适中	71	61	62
	偏热	8	19	31
冬季	偏冷	3	3	4
	适中	51	42	39
	偏热	46	54	57

2.2.5 热中性温度

采用温度频率法,将夏季、过渡季和冬季所测的车厢内温度分别以 0.5°C 为步长分成若干个空气温度区间。以每个温度区间的中间值为自变量,以每温度区间对应的被调查对象 MTS 为因变量,进行拟合分析。不同季节的线性拟合结果如图 5 所示。



注: R^2 为相关系数; y_{MTS} 为 MTS 值; T 为车厢温度。

图 5 乘客 MTS 与车厢内温度的关系

Fig. 5 Relationship between passenger MTS and compartment temperature

由图 5 可知, y_{MTS} 与车厢温度之间的相关系数均在 0.7 以上, 相关性较强, 说明 MTS 可以很好地反映人体热感觉。令 $y_{\text{MTS}} = 0$, 可得到不同季节的热

中性温度, 见表 8。

表 8 车厢乘客的热中性温度

Tab. 8 Thermal neutral temperature for compartment passengers

季节	热中性温度/ $^{\circ}\text{C}$	车厢实测温度(平均值)/ $^{\circ}\text{C}$
夏季	25.11	23.54
过渡季	24.40	24.35
冬季	11.67	20.98

从表 8 可以看出: 夏季车厢乘客的热中性温度高于实测的车厢内温度平均值, 说明乘客普遍认为夏季车厢内温度偏低; 冬季车厢乘客的热中性温度低于实测车厢内平均温度, 说明乘客感觉冬季车厢内温度偏高; 过渡季的热中性温度与实测空气平均温度差别很小, 说明乘客感觉过渡季车厢内温度适中。

由此可见, 拟合分析的预测结论与问卷调查结果基本一致。因此, 建议适当提高夏季车厢空调送风温度, 并降低冬季车厢空调送风温度。

2.2.6 不同天气的乘客主观感受

各季节不同天气下, 乘客热感觉评分的投票占比如表 9 所示。

由表 9 可见: 在夏季和过渡季, 与晴天相比, 雨天认为车厢偏冷(评分值为负值)的乘客占比略高; 在冬季, 晴天和雨天认为车厢偏暖的乘客占比相差不多, 且和雨天相比, 晴天评分值为 2 及 3 的乘客占比稍高。

各季节不同天气下乘客湿感觉评分的投票占比如表 10 所示。

由表 10 可见: 无论夏季、过渡季, 还是冬季, 与晴天相比, 在雨天认为车厢内偏潮(评分值为正)的乘客占比均较大, 且认为偏干的乘客占比均较小。

各季节不同天气下乘客吹风感评分的投票占比如表 11 所示。

由表 11 可以看出: 夏季、过渡季, 与晴天相比, 雨天车厢内吹风感评分值为 1(微风感)和 2(吹风感)的乘客明显较多, 说明雨天车厢内的乘客对吹风较敏感; 在冬季, 与雨天相比, 晴天吹风感的评分值为负值(闷)的乘客明显较多, 说明晴天时乘客会感觉更闷。

此外, 根据统计结果还可知: 地铁车辆开启供暖和制冷系统时, 晴天和雨天车厢内乘客的主观热感觉相差不多; 仅开启通风系统时, 车厢乘客的主观

表 9 各季节不同天气下乘客热感觉评分的投票占比

Tab.9 Passenger thermal sensation vote percentage under different weather conditions in each season

季节	天气	不同热感觉评分值的投票占比/%							占比合计/%
		-3 分	-2 分	-1 分	0 分	1 分	2 分	3 分	
夏季	晴天	1.1	4.6	19.1	67.6	6.9	0.7		100
	雨天		2.0	24.0	66.0	8.0			100
过渡季	晴天		1.5	12.4	67.0	13.9	2.6	2.6	100
	雨天		3.3	16.2	68.2	9.1	1.3	1.9	100
冬季	晴天	1.3	0.7	2.1	41.2	35.1	17.6	2.0	100
	雨天		1.4	1.4	45.1	34.7	16.0	1.4	100

表 10 各季节不同天气下乘客湿感觉评分的投票占比

Tab.10 Passenger humidity perception vote percentage under different weather conditions in each season

季节	天气	不同湿感觉评分值的投票占比/%							占比合计/%
		-3 分	-2 分	-1 分	0 分	1 分	2 分	3 分	
夏季	晴天	0.75	0.75	8.4	83.2	6.9			100
	雨天			7.7	82.7	9.6			100
过渡季	晴天		2.3	11.1	80.5	5.7	0.4		100
	雨天			9.0	69.0	19.4	2.6		100
冬季	晴天		1.4	24.8	71.8	2.0			100
	雨天		2.1	19.3	73.1	5.5			100

表 11 各季节不同天气下乘客吹风感评分的投票占比

Tab.11 Passenger draft perception vote percentage under different weather conditions in each season

季节	天气	不同吹风感评分值的投票占比/%							占比合计/%
		-3 分	-2 分	-1 分	0 分	1 分	2 分	3 分	
夏季	晴天		0.4	11.7	52.5	29.6	5.8		100
	雨天			12.5	45.8	35.4	6.3		100
过渡季	晴天		0.8	20.8	48.9	26.5	3.0		100
	雨天		1.9	16.1	45.2	33.6	3.2		100
冬季	晴天	1.3	6.1	33.8	35.8	21.0	2.0		100
	雨天	0.7	1.4	22.1	49.6	24.8	0.7	0.7	100

热感觉受天气的影响较大,晴天和雨天乘客的评价结果有明显的区别。

3 结语

1) 2 号线夏季、过渡季、冬季的热中性温度分别为 25.11℃、24.40℃、11.67℃。与实测值相比,乘客认为夏季车厢内温度偏低,冬季车厢内温度偏高,过渡季适中。建议适当提高夏季地铁车厢空调送风温度,适当降低冬季地铁车厢空调送风温度。

2) 在夏季、过渡季、冬季,地铁车厢内不同年龄层的乘客按热感觉平均值由高到低排序为:少年、青壮年、中老年。这说明中老年人喜好更高的环境

温度。地铁车厢内不同性别的乘客按热感觉平均值排序为:男性、女性。这说明对于相同车厢内温度,女性比男性更感觉冷一点,且女性对车厢内温度更敏感。随车厢内人数不断增加,认为车厢偏热的乘客比例不断上升,热感觉平均值与载客量正相关,建议可以根据载客量动态调节地铁车厢空调送风温度。

3) 在夏季和过渡季,与晴天相比,雨天认为车厢偏冷的乘客占比略高;对于在冬季认为车厢偏暖的乘客比例,晴天和雨天相差很小。在夏季和过渡季,车厢内乘客认为雨天的吹风感强于晴天吹风感;冬季车厢内的乘客认为晴天比雨天更闷。由此

建议未来根据天气情况适当调整地铁车厢送风风速。

参考文献

- [1] 中国能源中长期发展战略研究项目组. 中国能源中长期(2030、2050)发展战略研究-综合卷[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
Energy medium and long-term development strategy research project team of China. Energy medium and long-term (2030, 2050) development strategy research of China-comprehensive volume [M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [2] 林宇凡, 孙歌, 郑武幸, 等. 寒冷地区春季地铁车厢出行者适应性热舒适研究[J]. 暖通空调, 2021, 51(9): 119.
LIN Yufan, SUN Ge, ZHENG Wuxing, et al. Adaptive thermal comfort of underground railway coach travelers in cold zone in spring[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2021, 51(9): 119.
- [3] 王嘉琪. 郑州地铁车厢冬季热舒适研究[D]. 桂林: 桂林电子科技大学, 2020.
WANG Jiaqi. Research on thermal comfort of Zhengzhou subway in winter [D]. Guilin: Guilin University of Electronic Technology, 2020.
- [4] 石金枝. 南京地铁车厢夏季工况热环境调查与乘员热舒适性建模研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2020.
SHI Jinzhi. Thermal environment Investigation and passenger thermal comfort modeling of Nanjing subway cars in summer[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2020.
- [5] 管宏宇, 胡松涛, 刘国丹. 温和地区地铁车厢夏季热环境现状调查研究[J]. 暖通空调, 2019, 49(8): 63.
GUAN Hongyu, HU Songtao, LIU Guodan. Investigation and study on current situation of underground railway carriage thermal environment in summer in moderate zone[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2019, 49(8): 63.
- [6] 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.
- [7] 卢晶荣. 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.
- [8] 彭馨莹. 地铁车厢内空调气流组织模拟及优化[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2019.
PENG Xinying. Simulation and optimization of air conditioning airflow in subway compartment [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2019.
- [9] 胡溢艳. 基于地铁车厢内流动结构优化的数值模拟研究[D]. 上海: 东华大学, 2019.
HU Ziyang. Numerical simulation research on flow structure optimization in subway cabin [D]. Shanghai: Donghua University, 2019.
- [10] CHANG Z, YI K, LIU W. A new ventilation mode of air conditioning in subway vehicles and its air distribution performance [J]. Energy and Built Environment, 2021, 2(1): 94.
- [11] ASHRAE. Thermal environmental conditions for human occupancy: ANSI/ASHRAE Standard 55-2017[S]. Atlanta: ASHRAE Inc, 2017:16.
- [12] International Union of Railways. Heating, ventilation and air-conditioning in coaches: UIC 553—2004[S]. Paris: International Union of Railways(UIC), 2004:20.
- 收稿日期:2023-02-21 修回日期:2023-03-29 出版日期:2025-04-10
Received:2023-02-21 Revised:2023-03-29 Published:2025-04-10
- 第一作者:李丹, 硕士研究生, lidan1997510@163.com
通信作者:吴婧, 副教授, wujingcqu@163.com
- ©《城市轨道交通研究》杂志社, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license
- (上接第 83 页)
- Building Energy Conservation Research Center, Tsinghua University. 2018 annual report on China building energy efficiency[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018.
- [3] SU Z, LI X. Sub-system energy model based on actual operation data for subway stations [J]. Sustainable Cities and Society, 2020, 52: 101835.
- [4] 蔡宏武, 魏庆茂. 冷水机组运行性能评价及节能诊断[C]//中国建筑学会暖通空调分会, 中国制冷学会空调热泵专业委员会. 全国暖通空调制冷 2008 年学术文集. 重庆: 中国制冷学会, 2008:6.
CAI Hongwu, WEI Qingpeng. Chiller operating performance evaluation and energy-saving diagnosis [C]//The Architectural Society of China HVAC Branch, Air Conditioning Heat Pump Professional Committee of Chinese Association of Refrigeration. National HVAC Refrigeration 2008 Academic Collection. Chongqing: Chinese Association of Refrigeration, 2008:6.
- 收稿日期:2023-02-06 修回日期:2023-03-24 出版日期:2025-04-10
Received:2023-02-06 Revised:2023-03-24 Published:2025-04-10
- 第一作者:杨卓, 高级工程师, yz820217@163.com
通信作者:李晓峰, 副教授, xli@mail.tsinghua.edu.cn
- ©《城市轨道交通研究》杂志社, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license