

doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2023.01.020

西安地铁秋冬季 热环境与热舒适实测分析

谷雅秀¹, 黄星杰¹, 余良仕¹, 崔伟¹, 马壮壮¹,
黄泽茂², 屈长杰², 宫泽翔³, 檀姊静¹

(1. 长安大学建筑工程学院, 西安 710061; 2. 中铁第一勘察设计院集团有限公司, 西安 710043;
3. 山东省建筑设计研究院有限公司, 济南 250001)

摘要: 采用热环境实测和调查问卷相结合的方法, 研究西安地铁2号线过渡季、冬季车站及车厢热环境和热舒适情况。分析西安地铁2号线的5个典型代表车站及车厢在秋季过渡季和供暖季(2020年9月~2021年2月)的温度变化规律。研究发现, 冬季北客站地铁站的出入口和站厅平均温度分别为4.14和8.74℃, 不满足《地铁设计规范》(GB 50157—2013)的要求; 并得出西安地铁2号线秋季公共区域80%满意率的舒适区温度范围是15.7~22.8℃, 车厢是18.7~24.3℃, 冬季公共区域80%满意率的舒适区温度范围是12.3~16.1℃。采用热感觉投票(TSV)和热损失率(HDR)相结合的方法, 对地铁站热环境进行评价; 对比调查问卷结果, 对HDR进行修正, 得到适用于西安地铁冬季热环境的评价指标。该研究可为地铁站内通风空调系统的设计和运行管理提供可靠的基础数据, 有利于地铁乘客舒适热环境的营造。

关键词: 轨道交通; 热环境; 热舒适; 热损失率; 地铁站; 寒冷地区

中图分类号: U231

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2023)01-0133-08

Field Study on Thermal Environment and Thermal Comfort of Xi'an Metro in Autumn and Winter

GU Yaxiu¹, HUANG Xingjie¹, YU Liangshi¹, CUI Wei¹, MA Zhuangzhuang¹,
HUANG Zema², QU Changjie², GONG Zexiang³, TAN Zijing¹

(1. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061; 2. China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Xi'an 710043; 3. Shandong Architectural Design and Research Institute Co., Ltd., Jinan 250001)

Abstract: This study used a combination of thermal environment measurements and a thermal comfort questionnaire to investigate the temperature variation of five representative stations and carriages of the Xi'an Metro Line 2 in autumn and winter (September 2020–February 2021). In winter, the average temperature at the entrance and the station hall of Beikezhan station was 4.14℃ and 8.74℃, respectively, which did not meet the requirements for the design of metros (GB 50157—2013). The comfort zone of the metro public area and carriages were plotted and analyzed. The temperature range of the 80% satisfaction comfort zone in the public area of Xi'an Metro Line 2 was 15.7–22.8℃ during autumn, 18.7–24.3℃ in the carriage, and 12.3–16.1℃ in the public area during winter. In this study, the thermal environment of a metro station was evaluated by using a combination of thermal sensation vote and heatdeficit rate (HDR). Based on the results of the questionnaire, the HDR

收稿日期: 2022-01-30 修回日期: 2022-05-07

第一作者: 谷雅秀, 女, 博士, 副教授, 研究暖通空调与制冷, guyaxiu@chd.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(52008025)

引用格式: 谷雅秀, 黄星杰, 余良仕, 等. 西安地铁秋冬季热环境与热舒适实测分析[J]. 都市轨道交通, 2023, 36(1): 133–140.

GU Yaxiu, HUANG Xingjie, YU Liangshi, et al. Field study on thermal environment and thermal comfort of Xi'an metro in autumn and winter[J]. Urban rapid rail transit, 2023, 36(1): 133–140.

was modified to obtain a thermal environment evaluation index suitable for the Xi'an metro in winter. The study provided reliable basic data for the design and operation management of ventilation and air conditioning systems in metro stations, which is conducive to the construction of a comfortable thermal environment for metro passengers.

Keywords: rail transit; thermal environment; thermal comfort; heat-deficit rate; metro station; cold zone

1 研究背景

截至 2021 年底,中国内地有 50 座城市共开通地铁,运营线路 9 192.62 km^[1]。随着地铁运营里程的增加,乘客的平均通勤时间也随之增加,地铁热舒适的研究成为国内外关注的话题。科研人员在地铁站采用一系列舒适指标,对热环境和舒适状况进行了调查。由 Fanger 提出的预测平均投票数(predicted mean vote, PMV)和预测不满意百分数(predicted percent dissatisfied, PPD),被应用于分析地铁站的热舒适性^[2]。先前的研究表明,行为调整、心理习惯或期望以及对人们所接触条件的生理适应,能影响人们对热环境的适应,然而 PMV 和 PPD 却忽略了适应的心理维度^[3]。更重要的是,研究表明,对于地下建筑,调查问卷的预测平均投票 PMV 模型与平均热感觉投票(mean thermal sensation, MTS)值之间存在显著差异^[4]。

由于地铁站具有乘客密度大、流动性大、停留时间短等特点,美国运输部使用相对热指标(relative warmth index, RWI)与热损失率(heat deficit rate, HDR),评价地铁站厅、站台和轿厢的热舒适,进而确定空调设计参数^[5]。该指标考虑了人体在过渡空间的状态变化,RWI 适用于偏热环境,而 HDR 适用于偏冷环境,已经被学者使用^[6]。本研究以西安地铁 2 号线为例,利用现场测试与调查问卷,对地铁车站和轿厢的热环境与热舒适做出评价;基于 HDR 指标,对冬季西安地铁车站的热环境做出评估,与调查问卷结果相比较,判定 HDR 指标是否能准确评价西安地铁车站的热环境,并进行修正。

2 研究方法

2.1 研究对象

西安(34.30°N, 108.93°E)地处中国北方,根据《民用建筑热工设计规范》(GB 50176—2016)^[7],属于寒冷地区 B,冬季最冷月 1 月的平均气温-10~0℃。为全面掌握西安地铁 2 号线地铁热环境的真实情况,选取 5 个代表站(其中,北客站为地下综合交通枢纽且为端头站,北苑站、运动公园站、凤城五路站、市图书馆站 4 个站为标准站)作为研究的对象(该线车站为南北向双层地下岛站),研究西安地铁过渡季(9~11 月)和冬季(12 月~次年 2 月)车站及轿厢热环境和热舒适情况。在冬季,西安地铁站内公共区域的空调系统未运行,仅采用循环通风系统为乘客提供所需的新风量^[8]。在轿厢内,采用座椅电加热的方式供暖。

2.2 热环境实测

测试人员采用手持 Delta OHM-HD32.3 热指数仪,测试各测点(测点 1~7)的温度、相对湿度。在北客站的南广场、出入口、站厅、站台固定点,布置 4 个 HOBO 温湿度记录仪(固定测点 A~D),同时测试设备参数(见表 1),固定测点的布置如图 1 所示。以北客站进站口受访者为例,其动态测试路线如图 1、2 所示。

2.3 热舒适调查

乘客乘坐地铁的过程是一个动态过程,乘客对热环境的反应也是动态变化的。为使调查问卷内容与实际乘车情况一致,本研究将乘客乘坐地铁的动态全过程分为 6 个阶段,设置 7 个测试点,如图 1、2 所示。

表 1 测试设备参数
Table 1 Measure equipment parameter table



设备型号	参数	设备外观	设备参数			
			测量范围	精确度	分辨率	采样频率
HOBO-MX1101 温湿度记录仪 (固定测点)	温度和湿度		温度: -20~+70℃ 相对湿度: 1%~90%	温度: ±0.21℃ 相对湿度: ±2%	温度: 0.024℃ 相对湿度: 0.01%	次/h
Delta OHM-HD32.3 热指数仪 (动态测点)	温度和湿度 PMV 和 PPD		温度: -40~100℃ 相对湿度: 0~100% 黑球温度探头: -10~100℃ 风速探头: 0~5 m/s	温度: ±0.10℃ 相对湿度: ±1.5% 黑球温度探头: 0.1℃ 风速探头: ±0.05 m/s	温度: 0.1℃ 相对湿度: 0.1% 黑球温度探头: 0.1℃ 风速探头: 0.01 m/s	次/30 s



图1 北客站测试路线及测点分布
Figure 1 Testing route and point distribution of Beikezhan Station

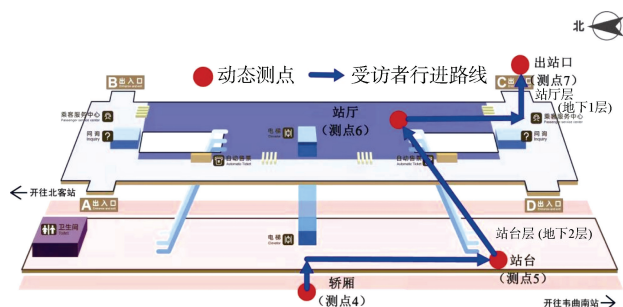


图2 标准站测试路线及测点分布
Figure 2 Testing route and point distribution of standard Station

在北客站及4个标准站进站口随机选取受访者, 跟随并引导其从出发站到到达站, 所有受访者都经过的过程有: 进站口(测点1)→站厅(测点2)→站台(测点3)→轿厢(测点4)→站台(测点5)→站厅(测点6)→出站口(测点7)。通过填写实时调查问卷, 记录同一受访者在7个测试点对热环境的感受, 同时另一组研究人员使用手持热指数仪进行现场测量, 获取周围环境参数(如温度、湿度、风速等)。

在热舒适调查问卷中, 个人信息包括受试者年龄、身高、体重、衣着等情况, 热感觉投票值按照 Fanger 提出的7级分度设计^[9], 如图3所示。

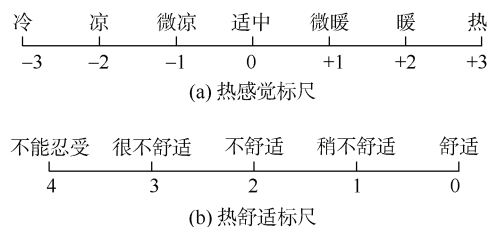


图3 Fanger 提出的7级分度设计
Figure 3 7-level indexing design proposed by Fanger

本次测试共获得有效调查问卷385份(秋季176份, 冬季209份)。在调查问卷中, 除年龄、身高、体重外, 还设有服装选项, 受访者根据自身衣着情况进行勾选。统计计算得出: 冬季平均服装热阻为1.56 clo(1 clo=0.155 m²·K/W), 秋季平均服装热阻为0.83 clo。受访者的基本信息统计情况如表2所示。

表2 受访者基本信息统计

Table 2 Statistics of subjects' personal information

类别	内容	比例/%	
		秋季	冬季
性别	男	54	58
	女	46	42
年龄/岁	<18	1.7	0
	18~25	52	46
	26~30	27	32.5
	31~40	11	12
	41~50	6	7.6
	51~60	2.3	1.4
	>60	0	0.5

3 实测分析

这里仅分析地铁运营时段的实测数据。统计设置于北客站外、出入口、站厅、站台的 HOBO-X1101 温湿度自记仪记录的数据, 可以得出冬季(12月至次年2月)各区域运营时段的温度变化曲线及温度上下限, 如图4~6所示。北客站出入口温度为-3.6~20.96℃, 站厅温度为-1.24~20.17℃, 站台温度为3.56~24.1℃。

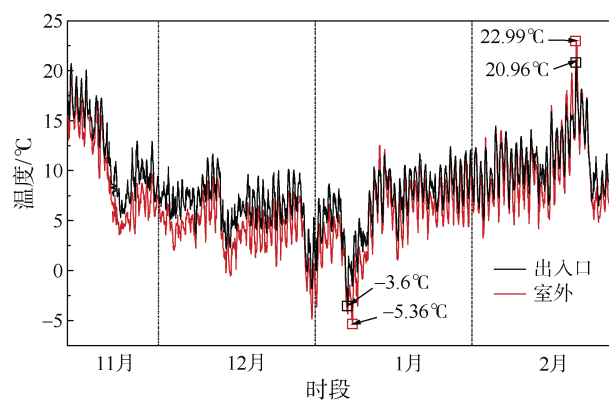


图4 北客站室外与出入口冬季温度的变化
Figure 4 Temperature change of outdoor and inlet and outlet of Beikezhan Station during winter

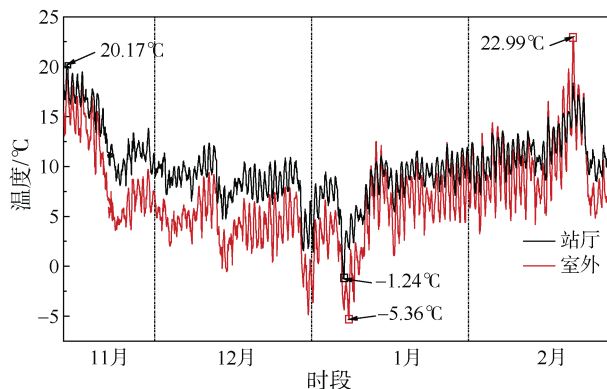


图5 北客站室外与站厅冬季温度的变化

Figure 5 Temperature change of outdoor and station hall of Beikezhan Station during winter

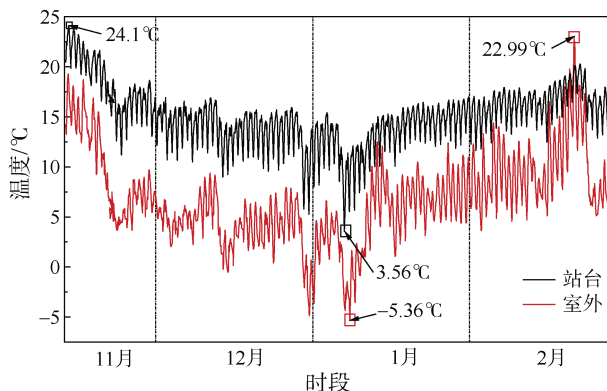


图6 北客站室外与站台冬季温度的变化

Figure 6 Temperature change of outdoor and platform of Beikezhan Station during winter

将实测得到的北客站、北苑、运动公园、市图书馆和凤城五路的温度值绘制为箱型图。根据《地铁设计规范》(GB 50157—2013),地下车站公共区域冬季室内的最低气温不得低于 12°C ^[10]。将各站温度与现行规范进行对比,结果如图7、8所示。

由图7可知,在冬季测试期间,公共区域的温度高于室外温度。同一车站不同位置的温度分布呈阶梯状,出入口(进站口和出站口)平均温度最低,站台平均温度略高于站厅温度。北客站出入口以及站厅在大部分时刻的温度低于 12°C ,其余4个标准站出入口多数时刻、站厅小部分时刻的温度也位于 12°C 以下,只有站台和轿厢的温度符合规范要求,且北客站出入口、站厅、站台平均温度比其他标准站的低。由于北客站为铁路与地铁共用的交通枢纽,其站厅层又为高铁旅客出站层,地下面积大,与地上连通的出站口多,且该层未运行空调系统,站外气流可直接通过出入口进入站内,所以造成温度随室外影响较大;而其他标准

站出入口少,相对封闭,受站外温度影响较北客站小。因此,建议加强对北客站出入口的防寒保温设计。在地铁运营时段,对同一区域不同时间所有的动态测试结果进行统计并求标准差,标准差越小,说明该区域温度波动较小。由表3可知,冬季北客站各区域温度的标准差低于其余4个标准站的值,说明北客站温度波动较小,与其余4站相比,北客站站内温度较为稳定。由图8可知,在秋季测试期间,各车站之间的温度差别较小,不同位置的温度分布呈阶梯状,轿厢与站台的温度范围相近,轿厢的平均温度为 22.9°C ,北客站和标准站站台的平均温度值均位于 21.97°C ~ 22.7°C 之间。

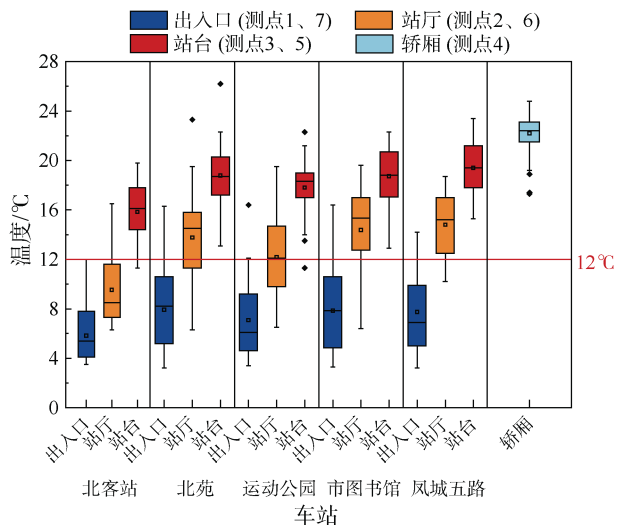


图7 冬季各车站公共区域及轿厢温度状况

Figure 7 Temperature box diagrams for each public area of the station and carriage during winter

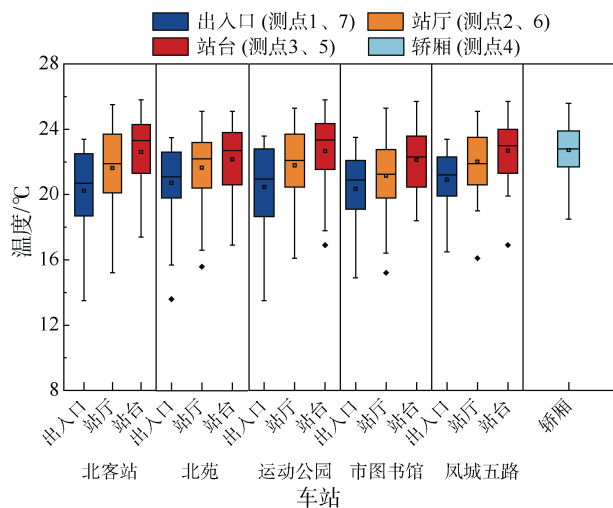


图8 秋季各车站公共区域及轿厢温度状况

Figure 8 Temperature box diagrams for each public area of the station and carriage during autumn

表3 秋冬季各车站温度标准差

Table 3 Standard deviation of temperature in each station in autumn and winter

位置	冬季		秋季	
	标准站	北客站	标准站	北客站
出入口	2.98	2	2.34	2.31
站厅	3.6	2.66	2.35	2.26
站台	2.54	2.04	1.73	1.35
轿厢	1.46		2.35	

4 调查结果

4.1 热感觉投票值分析

对调查问卷所得的热感觉投票值 TSV 进行统计。将 TSV=-3、-2、-1 标记为“偏冷”，将 TSV=1、2、3 标记为“偏热”，TSV=0 即为“适中”。根据以上 3 个区间，对 TSV 的数据进行统计。由表 3 可知，北客站冬季公共区域的温度与标准站的值有明显差异。因此，在分析冬季的调查问卷数据时，对北客站单独分析。秋季北客站公共区域的温度与标准站的温度无明显差异，故将各站的调查问卷数据整体分析。综上所述，笔者在进行热感觉研究时，将 5 个车站秋冬季的调查问卷数据分为冬季标准站、冬季北客站和秋季各站 3 部分进行分析，乘客热感觉投票的百分比结果显示于图 9 中。

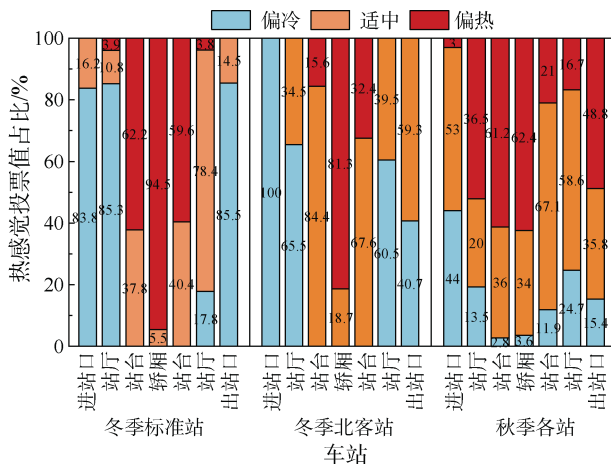


图9 秋冬季受访者热感觉投票情况

Figure 9 Percentage of respondents' thermal sensation vote in autumn and winter

可以看出，在冬季测试期间，标准站中的进出口处有 80% 以上受访者感觉“偏冷”。在乘客进站和出站的过程中，处于同一位置的热感觉存在明显差异：在进站过程中，站厅处有 85.3% 的乘客感觉“偏冷”，

站台处有 62.2% 的乘客感觉“偏热”；而在乘客离开轿厢出站的过程中，站台处有 59.6% 的乘客感觉“偏热”，站厅处仅有 17.8% 的乘客感觉“偏冷”。这说明，乘客乘坐地铁的全过程中，随着自身状态的不断变化，对于相同温度环境下的热感觉也发生变化。从站厅到站台，乘客的热感觉由“偏冷”变为“偏热”，当室外温度偏低时，人体对于冷环境的耐受度较强，而对于偏热环境的耐受度偏弱^[11]，乘客身着适合室外温度的服装进入地铁，随着地铁内温度的提升与乘客自身的活动，处于“偏热”的环境之中，人体开始蓄热，同时乘客的偏热耐受力减弱，因而更易感到热。进入轿厢内，因为轿厢内温度进一步提升，感觉“偏热”的乘客占比再度上升至 80% 以上。当乘客离开轿厢进入站台，随着周围环境温度的降低，感觉“偏热”的乘客占比开始减少。随着出站口温度的进一步降低，当乘客位于出站口时，人体明显感觉“偏冷”。

在北客站南广场进出口处，由于风速过大，所有进站受访者均感觉“偏冷”，站厅和站台的温度也小于标准站的值，因此在乘坐地铁的全过程中，感觉“偏热”的群体占比低于标准站的群体。由图 9 可知，北客站轿厢内感觉“偏热”的乘客仍然高达 81.3%，结合温度实测结果，说明标准站的站台与列车轿厢内均存在过热现象。总的来说，冬季地铁站出入口和轿厢的热环境都属于不适宜的状态。建议对出入口进行保温防寒优化设计，并对轿厢内座椅电加热系统进行关闭，以减轻轿厢内过热的现象。

在秋季测试期间，除了进站口外，大部分乘客处于“适中”以及“偏热”的状态。结合图 8 对秋季各车站公共区域及轿厢温度进行分析，5 个车站的温度都满足乘客热感觉需求。

4.2 舒适区绘制及分析

按照 Fanger 的 PMV 与 PPD 关系的求解方法，由本次实测的结果，得出实测热感觉投票 TSV 与 PPD 的数值，其拟合曲线如图 10 所示。

根据统计乘客热感觉投票，得到舒适区。将乘客热感觉投票值平均值在 -0.85~+0.85 之间记为可接受^[12]，投票值在其他区间记为不可接受。根据文献^[13]的标准，80% 的接受率为乘客可接受的温湿度范围^[12]，即 PPD(predicted percent dissatisfied) ≤ 20%。统计秋冬季节地铁车站公共区域和轿厢空间内满足 PPD ≤ 20% 时的温湿度范围。由于冬季轿厢内温度高于 24℃、相对湿度低于 30%，受访者均表示不满意，故无法统计

冬季轿厢的舒适区。其他区域 80%满意率的舒适区如图 11 所示。秋冬季轿厢与站内公共区域舒适区温度值范围如表 4 所示。

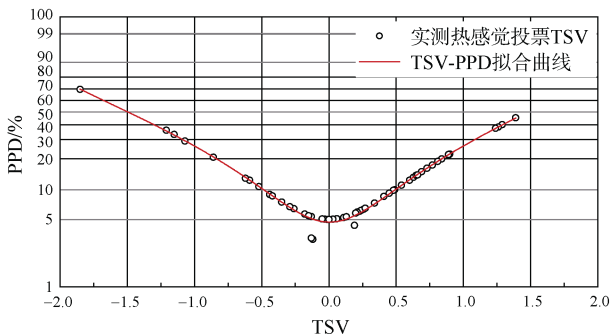


图 10 TSV 与 PPD 的关系

Figure 10 Relationship between TSV and PPD

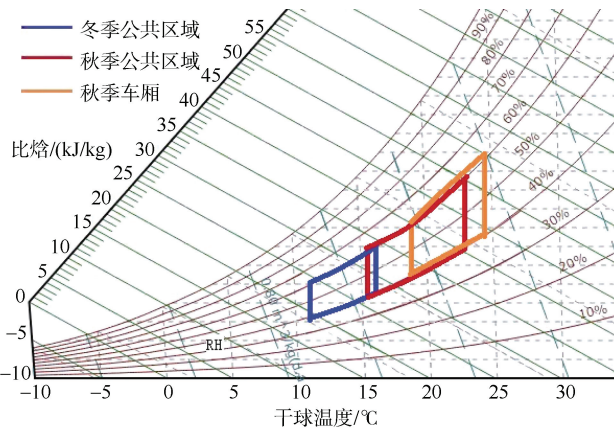


图 11 轿厢与站内公共区域 80%满意率的舒适区

Figure 11 80% satisfaction rate comfort zone for carriage and public area of the station

表 4 秋冬季轿厢与站内公共区域 80%满意率
舒适区的温度范围及温度中值

Table 4 Temperature range of 80% satisfaction rate comfort zone and medial temperature for carriage and public area of the station in autumn and winter

季节	位置	温度范围/℃	温度中值/℃
秋季	轿厢	18.7~24.3	21.5
	站内公共区域	15.7~22.8	19.3
冬季	轿厢	—	—
	站内公共区域	12.3~16.1	14.2

经统计，秋季车站站内公共区域的温度舒适区在 15.7~22.8℃，秋季轿厢内温度舒适区在 18.7~24.3℃，冬季车站站内温度舒适区在 12.3~16.1℃。根据乘客热感觉投票结果，秋季站内公共区域和轿厢推荐温度控制目标值分别为 19.3℃和 21.5℃，冬季站内公共区域

推荐温度控制目标值为 14.2℃。由实测发现，冬季轿厢的平均温度大于 22.9℃，高于规范建议的 16~20℃^[4]；热感觉投票结果表明，超过 80%的乘客感觉“偏热”。出于对乘客热舒适和节约能耗的考虑，所以建议冬季轿厢温度应适当调低。

4.3 HDR 计算及修正

地铁车站属于过渡空间，乘客在车站和轿厢的停留时间短，应该采用 HDR 指标评价冬季地铁乘客的热舒适。该指标不仅考虑到影响热舒适的常规因素，还考虑了人体在过渡空间内停留时间这一特殊因素。

4.3.1 计算方法

$$HDR = D / \Delta \tau = 28.39 - M(\tau) - \frac{6.42(t_a - 30.56) + RI_a}{I_{cw}(\tau) + I_a}$$
 (1)

式中： $M(\tau)$ 为乘客新陈代谢率， W/m^2 ； τ 为乘客从一个测点行走走到另一个测点所需的时间，s； I_a 为乘客所着服装外的空气边界层热阻，clo； $I_{cw}(\tau)$ 为服装热阻，clo； t_a 为环境空气干球温度，℃； $(t_a - 30.56)$ 为人体感受到舒适下限之前周边空气干球温度与体表平均温度的差值，℃； R 为乘客体表平均辐射得热， W/m^2 ； D 为热债， W/m^2 ； $\Delta \tau$ 为乘客在环境中的停留时间，s。

式(1)中，新陈代谢率 $M(\tau)$ 、平均辐射得热 R 的取值参考相关文献[6]。活动状态转换时的服装热阻 $I_{cw}(\tau)$ 和新陈代谢率 $M(\tau)$ 随乘客停留时间的关系，采用以下公式计算：

当 $\tau < 360$ s 时，有

$$I_{cw}(\tau) = I_{cw1} + (I_{cw2} - I_{cw1}) \frac{\tau}{360}$$
 (2)

$$M(\tau) = M_1 + (M_2 - M_1) \frac{\tau}{360}$$
 (3)

当 $\tau \geq 360$ s 时，有

$$I_{cw}(\tau) = I_{cw2}$$
 (4)

$$M(\tau) = M_2$$
 (5)

式中： I_{cw1} 为该状态开始时服装热阻，clo； I_{cw2} 为该状态结束时服装热阻，clo； M_1 为该状态开始时的新陈代谢率， W/m^2 ； M_2 为该状态结束时的新陈代谢率， W/m^2 ； τ 为该状态持续时间，s。

由以上公式可知，乘客在不同区域的停留时间会对服装热阻和新陈代谢率产生影响。人从一种活动状态过渡到另一种状态时，新陈代谢率和服装热阻要经过 6 min 才能达到稳定，在此期间二者与停留时间呈线性关系^[12]，从而影响到乘客的热舒适。

人员活动时,出汗和服装产生的鼓风现象会使服装热阻偏离通过叠加所得的原始服装热阻。在不同的运动状态下,人体与周围空气会产生不同的相对速度,即使原始服装热阻一样,实际的服装热阻(I_{cw2})也会发生变化,可以计算如下:

$$I_{cw2} = I_{cw1} + 0.246(V_{a1} - V_{a2}) \quad (6)$$

式中: $V_{a1}-V_{a2}$ 为不同活动状态下的等效行走速度差值, m/s。

4.3.2 结果分析

在冬季, HDR 指标的舒适范围为 $0 \sim -56 \text{ W/m}^2$ ^[12], 当 HDR 值为 0 时, 地铁车站内的温度达到乘客舒适温度的下限, 即该温度为乘客对热环境的最低要求, 低于该温度人体会感到“冷”。当 HDR 值为 -56 W/m^2 时, 即该温度为乘客对热环境的最高要求, 高于该温度, 人体会感到“热”。

HDR 的具体计算参数如表 5 所示, 分别将 HDR=0 和 HDR= -56 W/m^2 代入式(1), 计算得出北客站和标准站对应的冬季舒适温度的上下限, 如表 6 所示。

表 5 乘客进入车站具体参数

Table 5 Specific parameters for passenger access to stations

参数	出入口	站厅	站台
环境空气干球温度 $t/^\circ\text{C}$ (北客站)	4.14	8.74	14.23
环境空气干球温度 $t/^\circ\text{C}$ (标准站)	7.93	13.76	18.93
运动状态	步行	步行	步行
相对风速 V_a	1.5	1	0.5
新陈代谢率 $M/(\text{W/m}^2)$	123	119	115
服装热阻 I_{cw}/clo	1.56	1.56	1.56
服装外空气边界层热阻 I_a/clo	0.39	0.39	0.43
停留时间 τ/s	40~60	60~180	60~240

表 6 HDR 指标法计算所得冬季温度范围值

Table 6 Temperature range values calculated by applying the HDR indicator method

标准站温度/ $^\circ\text{C}$		北客站温度/ $^\circ\text{C}$	
下限	上限	下限	上限
15.15	22.63	5.03	12.35

由表 6 可知, 标准站的温度上下限分别为 22.63°C 和 15.15°C , 北客站的温度上下限分别为 12.35°C 和 5.03°C , 温度下限值明显小于规范规定的 12°C , 并且 HDR 指标法与调查问卷调研所得结果之间也存在较大差异, 偏离表 4 冬季车站 80% 满意率的舒适区温度 $3.75 \sim 7.27^\circ\text{C}$, 说明冬季并不能满足乘客热舒适要求, 因此需要对 HDR 指标进行修正。

针对基于 HDR 指标计算得出的温度限值, 以及实测调查问卷调研得到的热舒适温度限值, 绘制散点图; 对测得的环境空气干球温度进行拟合回归分析, 得到最佳拟合公式, 用于修正西安地铁车站的 HDR 方程^[8], 如图 12 所示。在相关性分析中, 两者呈显著相关, $R^2=0.8338$, 皮尔逊相关系数 $r=0.9131$ 。

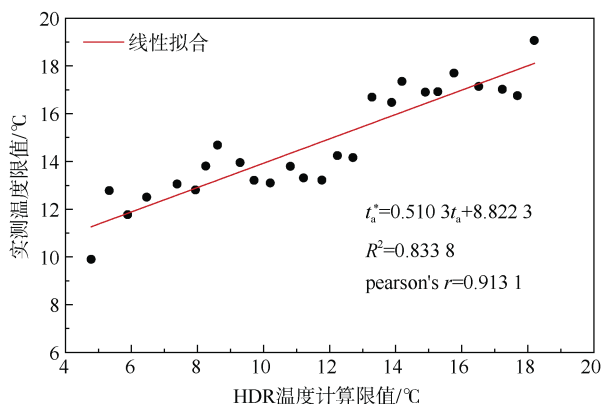


图 12 HDR 温度计算限值与实测温度限值的拟合

Figure 12 Fitting of HDR calculated temperature limit and measured temperature limit

拟合所得的公式为

$$t_a^* = 0.510 3 t_a + 8.822 3 \quad (7)$$

式中: t_a 为测试所得环境空气干球温度, $^\circ\text{C}$; t_a^* 为拟合修正后的计算温度, $^\circ\text{C}$ 。

再将其代入式(1), 即可得到

$$\text{HDR} = D / \Delta \tau = 28.39 - M(\tau) - \frac{6.42(0.510 3 t_a - 21.737 7) + R I_a}{I_{cw}(\tau) + I_a} \quad (8)$$

式(8)可用于西安冬季地铁热舒适的相关研究, 为后续西安地铁通风空调设计参数提供参考。

5 结论

1) 在秋季测试期间, 除了进站口外, 大部分乘客处于“适中”以及“偏热”的状态, 5 个测试车站公共区域及轿厢温度均满足乘客热感觉需求。

2) 在西安地区的冬季, 北客站出入口温度为 $-3.6 \sim 20.96^\circ\text{C}$, 站厅温度为 $-1.24 \sim 20.17^\circ\text{C}$, 站台温度为 $3.56 \sim 24.1^\circ\text{C}$ 。随着深度的增加, 室外温度对入口、站厅、站台温度的影响逐渐减弱。对于诸如北客站这样的地下交通综合枢纽, 宜对应调整环控设计方案。

3) 冬季北客站、北苑、运动公园、凤城五路和市图书馆的出入口温度都低于规范规定的 12°C , 并且北

客站和运动公园的站厅大部分时刻也不满足 12℃ 的要求。

4) 西安地铁 2 号线秋季公共区域 80% 满意率舒适区的温度范围是 15.7~22.8℃, 轿厢是 18.7~24.3℃, 冬季公共区域 80% 满意率舒适区的温度范围是 12.3~16.1℃。根据乘客热感觉投票结果, 秋季站内公共区域和轿厢推荐温度控制目标值分别为 19.3℃ 和 21.5℃, 冬季站内公共区域推荐温度控制目标值为 14.2℃。由实测可知, 冬季轿厢平均温度大于 22.9℃, 高于规范建议的 16~20℃, 且热感觉投票结果表明, 超过 80% 的乘客感觉“偏热”, 出于对乘客热舒适和节约能耗的考虑, 建议关闭冬季轿厢内的座椅电加热装置, 减轻轿厢内的过热现象。

5) 结合调查问卷结果, 对热损失率进行修正, 得到适用于西安地区地铁冬季热环境评价指标如公式(8)所示。

6) 调研发现, 西安地铁作为国内寒冷地区地铁系统的代表之一, 冬季地铁站出入口和轿厢的热环境都属于不适宜的状态。因此, 建议对出入口进行保温防寒优化设计; 同时, 考虑到地铁车辆制动产热、人员散热等因素, 应合理设置冬季轿厢内供暖系统的运行状态, 使轿厢内的环境温度维持在《公共场所卫生指标及限值要求》(GB 37488—2019) 建议的 16~20℃。

参考文献

- [1] 侯秀芳, 梅建萍, 左超. 2021 年中国内地城轨交通线路概况[J]. 都市轨道交通, 2022, 35(1): 12-16.
HOU Xiufang, MEI Jianping, ZUO Chao. An overview of urban rail transit lines in the Chinese mainland in 2021[J]. Urban rapid rail transit, 2022, 35(1): 12-16.
- [2] FANGER P O, TOFTUM J. Extension of the PMV model to non-air-conditioned buildings in warm climates[J]. Energy & buildings, 2002, 34(6): 533-536.
- [3] BRAGER G S, DEAR R. Thermal adaptation in the built environment: a literature review[J]. Energy and buildings, 1998, 27(1): 83-96.
- [4] CONCEICAO E Z E, GOMES J M M, ANTAO N H, et al. Application of a developed adaptive model in the evaluation of thermal comfort in ventilated kindergarten occupied spaces[J]. Building and environment, 2012, 50: 190-201.
- [5] United States Department of Transportation. Principles and applications: subway environment design hand book[M]. Washington. D.C.: Urban Mass Transportation Administration Office of Research and Development, 1975.
- [6] 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.
ZHU Peigen, WANG Chunwang, TONG Xiaona, et al. Research on dynamic thermal comfort evaluation of passengers in underground railway station[J]. HV&AC, 2016, 46(2): 101-104.
- [7] 民用建筑热工设计规范: GB 50176—2016[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
Code for thermal design of civil building: GB 50176—2016[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016.
- [8] 陈思伊. 西安地铁车站热环境评价及设计温度研究[D]. 西安: 长安大学, 2018.
CHEN Siyi. Study on thermal environment evaluation and design temperature criterion of Xi'an metro station[D]. Xuan: Chang'an University, 2018.
- [9] FANGER P O. Thermal comfort[M]. New York: Robert Ekrieger Publish Company, 1982.
- [10] 地铁设计规范: GB 50157—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013: 122-126.
Code for design of metro: GB 50157—2013[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013: 122-126.
- [11] 余娟. 不同室内热经历下人体生理热适应对热反应的影响研究[D]. 上海: 东华大学, 2012.
YU Juan. Studies on the effects of physiological acclimatization on thermal responses of people accustomed to different thermal indoor environments[D]. Shanghai: Donghua University, 2012.
- [12] 黄晨. 建筑环境学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
HUANG Chen. Built environment[M]. Beijing: China Machine Press, 2010.
- [13] Thermal environmental conditions for human occupancy: ASHRAE Standard 55—2004[S]. Atlanta, 2004.
- [14] 孙波, 姚孝元, 潘力军, 等. 《公共场所卫生指标及限值要求》(GB 37488—2019) 标准解读[J]. 环境卫生学杂志, 2021, 11(3): 268-274.
SUN Bo, YAO Xiaoyuan, PAN Lijun, et al. Interpretation of the Hygienic Indicators and Limits for Public Places (GB 37488—2019)[J]. Journal of environmental hygiene, 2021, 11(3): 268-274.

(编辑: 傅依萱)