



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2403355

引用格式:张无垠,盛旭高,毛军,等.基于改进PMV-PPD模型的北京地铁车站公共区环境舒适性评价及预测[J].科学技术与工程,2025,25(9):3851-3860.

Zhang Wuyin, Sheng Xugao, Mao Jun, et al. Environmental comfort evaluation and prediction of Beijing metro station public area based on improved PMV-PPD model[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(9): 3851-3860.

基于改进PMV-PPD模型的北京地铁车站 公共区环境舒适性评价及预测

张无垠¹, 盛旭高^{2*}, 毛军², 赵明珠¹, 祝瑞男¹, 刘正³

(1. 北京市地铁运营有限公司, 北京 100040; 2. 北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044;

3. 航天宏图信息科技北京有限公司, 北京 100044)

摘要 地铁车站环境舒适性问题通常采用预计平均热感觉指数(predicted mean vote, PMV)及预计不满意百分数(predicted percent dissatisfied, PPD)进行分析,基于PMV-PPD舒适性指标计算模型,研究不同环境参数对舒适度的权重占比,考虑乘客衣着状态及运动状态的时空特性,改进PMV计算模型,考虑环境温度剧烈变化对舒适度的影响,改进PPD计算模型,并基于改进的PMV-PPD计算模型研究车站公共区的环境舒适性。在此基础上,采用长短期记忆(long short-term memory, LSTM)神经网络,对环境舒适度进行预测,研究预测方法的可行性。研究表明:新陈代谢率、空气温度、服装热阻、相对湿度对环境舒适度的权重占比分别为0.558、0.260、0.113、0.069;时间一定时,站台不同监测点处的PMV、PPD的最大差值分别约为15%、60%;改进后的PMV-PPD计算模型相对于传统的PMV-PPD计算模型更具有普适性;神经网络可以较好地预测PMV及PPD值,PMV实际值与预测值的最大误差为8%,PPD实际值与预测值的最大误差为14%。

关键词 站台; PMV; PPD; 权重; 神经网络

中图分类号 TU831.3;

文献标志码 A

Environmental Comfort Evaluation and Prediction of Beijing Metro Station Public Area Based on Improved PMV-PPD Model

ZHANG Wu-yin¹, SHENG Xu-gao^{2*}, MAO Jun², ZHAO Ming-zhu¹, ZHU Rui-nan¹, LIU Zheng³

(1. Electromechanical Branch of Beijing Metro Operation Co., Ltd., Beijing 100040, China;

2. Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

3. Aerospace Macro Information Technology Beijing Co., Ltd., Beijing 100044, China)

[Abstract] The issue of comfort in subway stations is typically analyzed using the predicted mean vote (PMV) and the predicted percent dissatisfied (PPD) indices. Based on the PMV-PPD comfort indices calculation model, the weight proportions of different environmental parameters on comfort were studied. The PMV calculation model was improved by considering the spatiotemporal characteristics of passengers' clothing and activity levels. The PPD calculation model was enhanced by taking into account the impact of drastic environmental temperature changes on comfort. The environmental comfort of public areas in stations was then analyzed using the improved PMV-PPD calculation model. On this basis, the feasibility of predicting environmental comfort using long short-term memory (LSTM) networks was explored. The research results indicate that the weight proportions of metabolic rate, air temperature, clothing thermal resistance, and humidity on environmental comfort are 0.558, 0.260, 0.113, and 0.069, respectively. At a given time, the maximum differences in PMV and PPD at different monitoring points on the platform are approximately 15% and 60%, respectively. The improved PMV-PPD calculation model is found to be more universally applicable compared to the traditional PMV-PPD calculation model. The neural network is shown to accurately predict PMV and PPD values, with a maximum error of 8% for PMV and 14% for PPD between the actual and predicted values.

[Keywords] platform; PMV; PPD; weight; neural network

收稿日期: 2024-05-07 修订日期: 2024-12-26

基金项目: 北京市地铁运营有限公司科技项目(JC2022WN-03, C22GY00210); 国家自然科学基金(52172336)

第一作者: 张无垠(1991—), 男, 汉族, 北京人, 工程师。研究方向: 地铁机电设备专业运维管理。E-mail: wuyin1991@sina.com。

* 通信作者: 盛旭高(1997—), 男, 汉族, 山东青岛人, 博士研究生。研究方向: 通风空调。E-mail: shengxugao111@163.com。

近年来,随着地铁线路的不断扩张,地铁系统已成为城市交通的重要组成部分,地铁车站公共区的环境舒适性问题、地铁环境调控系统的节能减排及自动化闭环预测调控的发展问题越发受到人们关注。环境舒适性会影响乘客的乘车体验,长期在不良环境下乘车,对乘客的身体健康会造成严重影响,让系统在低能源消耗的情况下保障乘客的舒适性,是较为合理的方法,同时,地铁的环境调控系统目前大多数采用的是开环人工给定参数控制,其最终会往闭环动态预测控制的方向发展,因此,有必要开展地铁车站公共区的环境舒适性及舒适度的可预测性研究^[1-3]。

目前,在地铁车站的环境舒适性问题,国内外学者已做了大量研究工作,Liu等^[4]利用预计平均热感觉指数(predicted mean vote, PMV)计算模型研究了地铁列车客运量与送风量对舒适性的影响,给出了满足舒适性条件的送风量与送风温度的时域曲线。Ren等^[5]利用PMV计算模型研究了地铁车厢内部的舒适性情况,给出了不同通风方式下地铁车厢的PMV。Katavoutas等^[6]在地铁车站现场实测了空气温度及空气相对湿度等环境参数,利用预计平均热感觉指数PMV与预计不满意百分数(predicted percent dissatisfied, PPD)对地铁环境进行了舒适性分析,发现站台的深度和设计特征会影响人体的热舒适性,站台深度大,站台的PMV低。向清河等^[7]利用PMV及PPD计算模型研究了车厢内部不同截面处的PMV及PPD的分布情况,发现车厢壁面附近处的PMV及PPD相对偏大,车厢中部区域的舒适性相对较好。陈阳等^[8]通过PMV及PPD舒适性分析指标,分析了地铁列车内的舒适性环境,发现乘客的活动状态不同,达到舒适状态所需的环境温度不同,活动状态较强的乘客进入强冷车厢较为合适,活动状态较弱的乘客进入若冷车厢较为合适。以上对于地铁环境舒适性的分析皆采用了PMV计算模型,且分析的重点放在地铁环境PMV的分布上,并未分析计算模型各参数对计算结果的影响程度,同时,由于PMV的计算是基于稳态环境的,而PPD是基于PMV进行计算的,上述研究并未考虑环境剧烈变化对PPD的影响,且没有考虑现场乘客在不同时间空间下的衣着状态及活动状态对PMV的影响,也未考虑温度剧烈变化时PMV及PPD的可预测性。

基于此,现考虑公共区各环境参数对舒适度的影响,研究各环境参数对舒适度的权重占比,同时考虑地铁车站公共区乘客的衣着状态与活动状态的时空变化特性,对公共区乘客的衣着状态与活动

状态进行加权处理,改进PMV计算模型;并基于环境温度大幅度变化的情况,改进PPD计算模型,利用改进的PMV-PPD计算模型,基于站台传感器实测数据,对站台环境舒适性进行研究;在此基础上,采用LSTM神经网络进行舒适性指标的预测,为改善地铁环境舒适性、调控系统的节能减排以及自动化闭环预测调控的发展提供理论支撑。

1 传感器布局与环境舒适度指标

1.1 站台传感器布局

车站公共区环境舒适性分析以站台作为研究对象,着重分析站台环境的舒适性,站台共计布置5个温湿度传感器,均位于站台北侧,每个温湿度传感器可以监测空气温度与相对湿度,传感器具体布局情况如图1所示,标记为N1~N5,所有传感器皆与站台底部相距2.7 m左右,与北侧屏蔽门相距1 m。

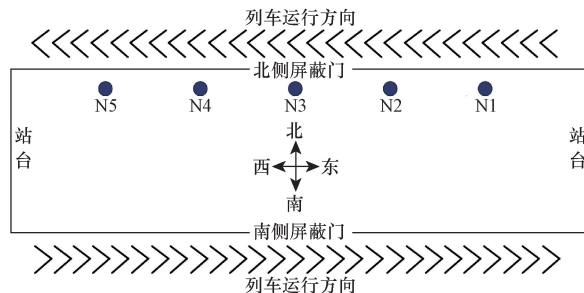


图1 站台传感器布局

Fig. 1 Platform sensor layout

1.2 环境舒适性指标

站台环境舒适性的分析主要采用两个舒适性指标,分别为预计平均热感觉指数PMV与预计不满意百分数PPD,其中预计平均热感觉指数PMV可表示乘客在特定环境条件下对热感觉的主观评价,从-3(冷)到3(热)采用7个量级进行热感觉主观评价,通常情况下,乘客更喜欢接近零的PMV,因为PMV接近于零表示环境条件比较舒适,PMV与人体热感觉的对应关系如表1所示,PMV模型的计算公式如式(1)所示^[9]。

表1 人体热感觉

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

$$PMV = [0.303 \exp(-0.036M) + 0.028] \{M - W - 3.05 \times 10^{-3} \times [5733 - 6.99(M - W) - P_a] - 0.42(M - W - 58.15) - 1.7 \times 10^{-5}M(5867 - P_a) - 0.0014M(34 - t_a) - 3.96 \times 10^{-8}f_{cl}[(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] - h_{cl}f_{cl}(t_{cl} - t_a)\} \quad (1)$$

式(1)中:W为人体机械功,W/m²,人体机械功取值为零;t_a为空气的温度,℃;t_r为黑球温度,℃,经现场实测,站台黑球温度约低于空气温度1℃左右,黑球温度的取值低于传感器实测空气温度1℃;P_a为水蒸气分压力,Pa;t_{cl}为人体着装后外表面温度,℃,计算公式如式(2)所示;h_c为对流换热系数,计算公式为式(3)所示;f_{cl}为服装面积系数,计算公式如式(4)所示;M为新陈代谢率,W/m²,人体新陈代谢率与活动状态的映射关系如表2所示^[10]。

$$t_{cl} = 35.7 - 0.028(M - W) - I_{cl} \{3.96 \times 10^{-8}f_{cl}[(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] + f_{cl}h_c(t_{cl} - t_a)\} \quad (2)$$

$$h_c = \begin{cases} 2.38 |t_{cl} - t_a|^{0.25}, & 2.38 |t_{cl} - t_a|^{0.25} \geq 12.1 \sqrt{v_{ar}} \\ 12.1 \sqrt{v_{ar}}, & 2.38 |t_{cl} - t_a|^{0.25} < 12.1 \sqrt{v_{ar}} \end{cases} \quad (3)$$

式中:v_{ar}为空气流速,m/s。

$$f_{cl} = \begin{cases} 1.00 + 1.29I_{cl}, & I_{cl} \leq 0.078 \\ 1.05 + 0.645I_{cl}, & I_{cl} > 0.078 \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中:I_{cl}为服装热阻,其有两种表达形式,分别为clo和m²·K/W,1clo=0.155m²·K/W,服装热阻的取值如表3所示^[11]。

表2 人体新陈代谢率

Table 2 Metabolic rate of body

活动状态	新陈代谢率/(W·m ⁻²)
静坐休息	58.15
站立或偶尔走动	116.30
步行(3 km/h)	139.56

表3 服装热阻

Table 3 Clothing thermal resistance

服装类型	服装热阻/clo	服装热阻/(m ² ·K·W ⁻¹)
炎热季节服装: 短裤、短T恤、薄袜、凉鞋	0.35	0.054 25
一般的夏季服装: 短裤、长裤、短T恤、薄短袜、鞋子	0.5	0.077 5
薄的工作服装: 薄内衣、衬衫、工作裤、棉袜、鞋子	0.7	0.108 5

预计不满意百分数PPD通常与预计平均热感觉指数PMV一起使用,其是预计平均热感觉指数PMV的函数。PPD可用来表示在给定的热环境条件下,有多少乘客会对站台环境感到不满意或不舒适,其可用来评估站台环境的舒适性,PPD计算公式^[9]如式(5)所示。

$$PPD = 100 - 95 \exp[-(0.2179PMV^2 + 0.03353PMV^4)] \quad (5)$$

图2给出了PMV与PPD的映射关系,可以看出,随着PMV值从-3逐渐增大到3,PPD先减小后增大,且关于PMV=0对称。

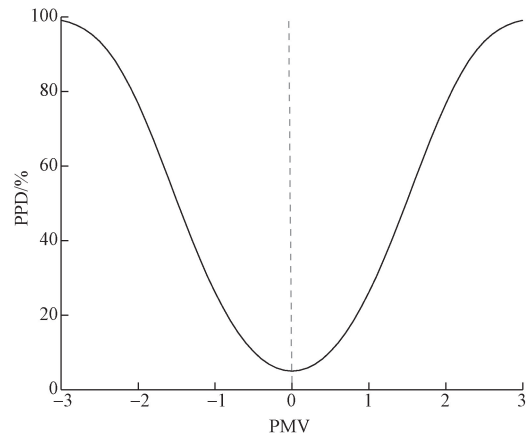


图2 PMV-PPD映射关系

Fig. 2 PMV-PPD mapping

2 正交模拟试验

2.1 试验因素及水平

为研究站台各环境参数对环境舒适度的影响程度,设计正交模拟试验,试验因素选取4个,分别为空气温度、相对湿度、人体新陈代谢率与服装热阻,各因素水平数为3,其中空气温度与相对湿度根据现场传感器监测的数值区间取值,新陈代谢率以及服装热阻根据表2及表3取值,建立正交模拟试验水平表,如表4所示。所做研究主要针对车站站台环境,根据现场风速传感器实测,站台风速接近于零,图3为车站站台中央风速传感器所测实测数据,可以看出,站台风速绝大部分时间为零,而图中的风速波动是受到活塞风的影响,时间极短,因此在考虑风速时认为站台风速为零。

表4 正交模拟试验水平值

Table 4 Orthogonal simulation test level value

水平	空气温度/℃	相对湿度/%	新陈代谢率/(W·m ⁻²)	服装热阻/clo
1	25	36	58.15	0.35
2	29	53	116.30	0.5
3	32	60	139.56	0.7

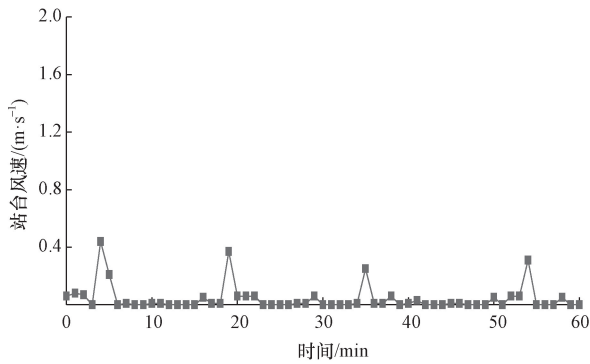


图3 站台风速

Fig. 3 Platform wind speed

2.2 试验结果及分析

给定正交模拟试验水平值后,需设计正交表,正交表中各参数分布及各次试验计算结果如表5所示。

表6给出了正交模拟试验的结果分析,表6中编号I表示各因素水平1的PMV绝对值的和值,编号II表示各因素水平2的PMV绝对值的和值,编号III表示各因素水平3的PMV绝对值的和值,编号R表示正交模拟实验各因素、各水平PMV绝对值和值的极差。从表6可以看出,各因素极差R从大到小排列分别为:新陈代谢率、空气温度、服装热阻、相对湿度,即表明对PMV结果影响最为显著的因素为新陈代谢率,其次为空气温度,再次为服装热阻,影响最低的是相对湿度。

表5 正交模拟试验参数及结果
Table 5 Orthogonal simulation test level value

序号	空气温度/°C	相对湿度/%	新陈代谢率/(W·m ⁻²)	服装热阻/clo	PMV
1	25	36	58.15	0.35	-0.157
2	25	53	139.56	0.5	1.798
3	25	60	116.30	0.7	1.657
4	29	36	139.56	0.7	2.054
5	29	53	116.30	0.35	1.693
6	29	60	58.15	0.5	1.144
7	32	36	116.30	0.5	1.792
8	32	53	58.15	0.7	1.527
9	32	60	139.56	0.35	2.257

表6 正交模拟试验结果分析
Table 6 Analysis of orthogonal simulation test results

编号	空气温度/°C	相对湿度/%	新陈代谢率/(W·m ⁻²)	服装热阻/clo
I	3.612	4.003	2.828	4.107
II	4.891	5.018	5.142	4.734
III	5.576	5.058	6.109	5.238
极差R	1.964	1.055	3.281	1.131

3 层次分析法权重确定

3.1 试验因素及水平

在正交模拟试验得到各因素对PMV计算结果的影响程度排序后,为进一步确定各因素的权重,基于层次分析法量化各因素的权重大小。量化各因素的权重大小需进行因素间重要程度的比较,表7给出了因素间比较的不同重要程度。

表7 因素间重要程度比较

Table 7 Comparison of importance degree among factors

因素 <i>i</i> 比因素 <i>j</i>	量化值
同等重要	1
稍微重要	3
较强重要	5
强烈重要	7
极端重要	9
两相邻判断的中间值	2, 4, 6, 8
倒数	$a_{ij} = 1/a_{ji}$

注: a_{ij} 表示两个因素之间的重要程度量化值^[12]。

为进行各因素权重分析,需进一步给出判断矩阵,将新陈代谢率、服装热阻、空气温度、相对湿度分别标号为1、2、3、4,由正交试验可知,对PMV结果影响显著的因素从高到低排列分别为新陈代谢率、空气温度、服装热阻、相对湿度,由此给出判断矩阵A如式(6)所示。

$$A = [a_{ij}] = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 5 & 6 \\ 1/3 & 1 & 3 & 4 \\ 1/5 & 1/3 & 1 & 2 \\ 1/6 & 1/4 & 1/2 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

式(6)中: a_{ij} 为标号为*i*的因素与标号为*j*的因素的重要程度量化值。

采用和积法对判断矩阵A进行处理,将矩阵A按列归一化可得矩阵E,如式(7)所示。

$$E = \begin{bmatrix} 0.588 & 0.655 & 0.526 & 0.462 \\ 0.196 & 0.218 & 0.316 & 0.308 \\ 0.118 & 0.073 & 0.105 & 0.154 \\ 0.098 & 0.054 & 0.053 & 0.076 \end{bmatrix} \quad (7)$$

将E矩阵每一行进行平均,即可得到权重向量C,如式(8)所示,向量C中的0.558、0.260、0.113、0.069分别为新陈代谢率、空气温度、服装热阻、相对湿度的权重,这也进一步验证了正交模拟试验结果的准确性。

$$C = [0.558 \quad 0.260 \quad 0.113 \quad 0.069]^T \quad (8)$$

3.2 一致性检验

为验证权重向量的准确性,采用一致性指标 CI、随机一致性指标 RI 以及一致性比率 CR 对权重向量的准确性进行判断,其中 CI 计算公式如式(9)所示^[12]。

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (9)$$

式(9)中: n 为矩阵 E 的阶数, n 为4; λ_{\max} 为矩阵 E 最大特征值,其计算公式如式(10)所示^[12]。

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{(AC)_i}{nC_i} \quad (10)$$

式(10)中: i 为矩阵第 i 行数据; C_i 即为矩阵 C 的第 i 行数据。

随机一致性指标 RI 可通过查表获取,RI 的取值与矩阵阶数 n 相关, n 与 RI 的映射关系如表 8 所示^[13],RI 取值为 0.90。

表 8 随机一致性指标 RI

Table 8 Analysis of orthogonal simulation test results									
n	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

得到一致性指标 CI 与随机一致性指标 RI 后,可计算一致性比率 CR,其计算公式如式(11)所示^[12]。

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (11)$$

经计算所得, λ_{\max} 为 4.079,CI 为 0.026 5,CR 为 0.029 4。而 $0.029 4 < 0.1$,说明矩阵 A 的不一致范围在允许范围内,可用 A 的权重向量 C 大体表示各因素对预计平均热感觉指数 PMV 的影响权重。

4 改进 PMV-PPD 计算模型

从获得的权重向量 $C = [0.558 \quad 0.260 \quad 0.113 \quad 0.069]$ 可以看出,新陈代谢率、空气温度、服装热阻对 PMV 的影响相对较大,相对湿度对 PMV 的影响相对较小,考虑新陈代谢率、空气温度及服装热阻对环境舒适度的影响,结合实际环境对 PMV-PPD 计算模型进行改进。

实际地铁车站环境中,乘客是走动的,乘客的衣着状态以及活动状态随时间及空间的变化而变化,因此为进行普适性分析,将传统 PMV 中的乘客新陈代谢率以及服装热阻进行加权分析,给出一个车站环境内平均化的新陈代谢率以及服装热阻,用以计算 PMV,式(12)及式(13)为给出的加权平均处理公式。

$$M = \frac{1}{S} \sum_{k=1}^S (A_p B_p^T) \quad (12)$$

式(12)中: B_p 为乘客的新陈代谢率向量 $[b_1 \quad b_2 \cdots b_i]$, W/m^2 , $b_i(i=1,2,\dots,N)$ 为选取的 N 个新陈代谢率,人体新陈代谢率取值如表 2 所示,共计 3 个,新陈代谢率向量 B_p 为 $[58.15 \quad 116.3 \quad 139.56]$; A_p 为乘客新陈代谢率权重向量 $[a_1 \quad a_2 \cdots a_i]$, $a_i(i=1,2,\dots,N)$ 为新陈代谢率权重因子; S 为地铁乘客人数。

$$I_{cl} = \frac{1}{S} \sum_{k=1}^S (0.155 C_p D_p^T) \quad (13)$$

式(13)中: D_p 为人员的服装热阻向量 $[d_1 \quad d_2 \cdots d_j]$, clo , $d_j(j=1,2,\dots,L)$ 为选取的 L 个服装热阻值,服装热阻取值如表 3 所示,共计 3 个,服装热阻向量 D_p 为 $[0.35 \quad 0.5 \quad 0.7]$; C_p 为地铁乘客服装热阻权重向量 $[c_1 \quad c_2 \cdots c_j]$, c_j 为服装热阻权重因子。

改进的 PMV 计算模型除了考虑乘客新陈代谢率以及服装热阻,因此基于改进的 PMV 所得的 PPD 也是考虑了这两个因素,但改进 PMV 的计算是基于稳态环境进行的,即温度变化不大的环境下进行的,而车站站台不同空间点位的温度变化差值较大,因此考虑空气温度的剧烈变化对环境舒适度的影响是十分重要的,需对预计不满意百分数 PPD 计算模型进行改进。

结合 Zhang 等^[14]的试验数据,对 PPD 计算模型进行改进,图 4 给出了该试验的空气温度条件,共计 6 个空气温度工况,所有空气温度工况都是周期变化,不同工况间的主要区别在于温度大小与周期大小的差别上。

图 5 给出了 Zhang 等^[14]试验环境下的环境不满意度,其中图 5 中的工况 1~工况 6 分别对应图 4 中的工况 1~工况 6。图 5 中 TPPD 为试验人员的环境不满意度,PPD 为基于 PPD 计算模型所得的环境不满意度。

Zhang 等^[14]的试验结果表明,在环境空气温度变化范围较大时,实际试验人员的环境不满意度与 PPD 计算模型所计算的环境不满意度有所差别,因此对 PPD 计算模型与试验人员的环境不满意度进行时均化处理并做差,并将差值再次进行时均化处理,同时给定一个调节因子 e ,实现对 PPD 计算模型的改进,改进后的计算模型如式(14)所示。

$$EPPD = \begin{cases} PPD, & \frac{R}{60} < 0.05 \\ PPD - \frac{e}{t_2 - t_1} \left(\int_{t_1}^{t_2} PPD dt - \int_{t_1}^{t_2} TPPD dt \right), & \\ \frac{R}{60} \geq 0.05 \end{cases} \quad (14)$$

式(14)中: $EPPD$ 为改进的 PPD 计算模型, R 为 60 min 内的空气温度极差, $^{\circ}C$; e 为调节因子。

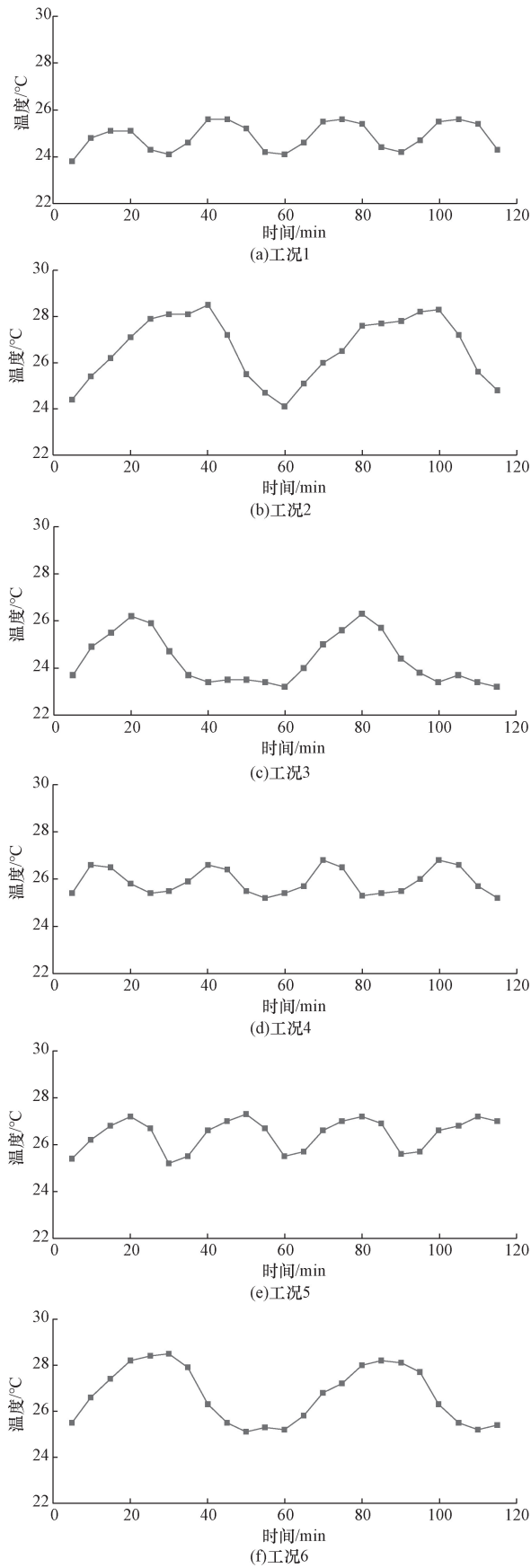


图4 空气温度条件
Fig. 4 Air temperature condition

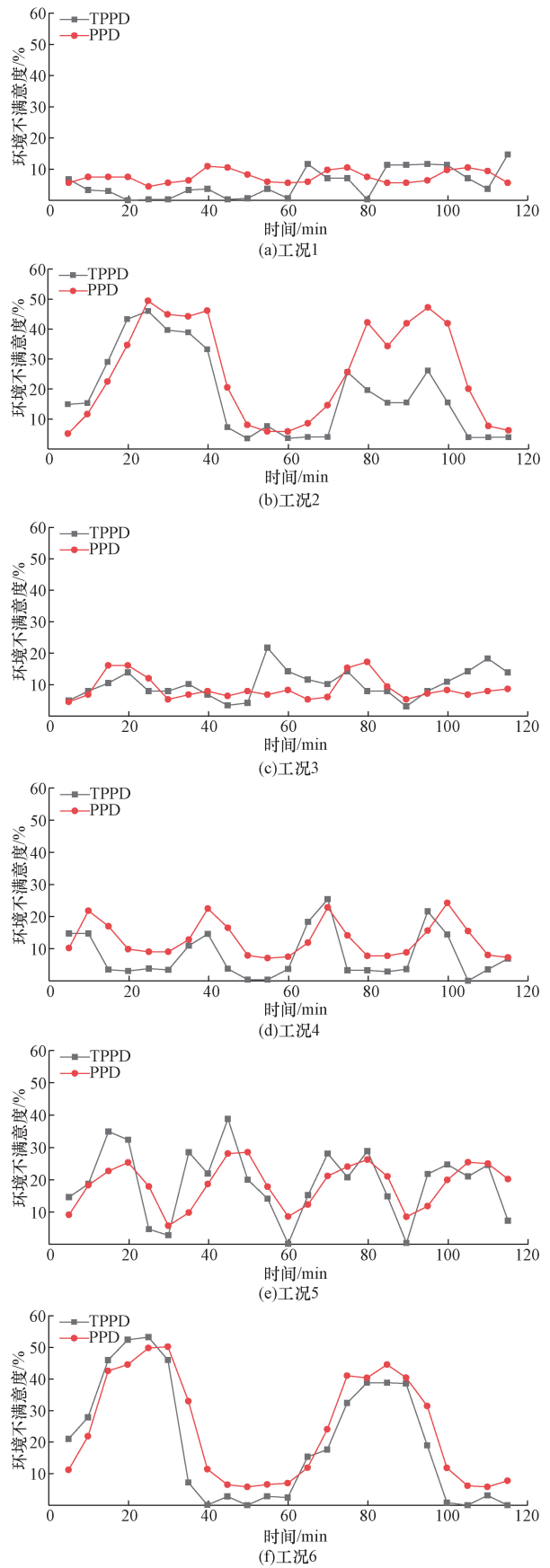


图5 环境不满意度
Fig. 5 Environmental dissatisfaction

式(15)给出了基于 Zhang 等^[14]的试验数据计算所得的 EPPD 计算公式, e 取值 0.5, EPPD 根据极值 R 的取值范围划分为两部分组成, 第一部分为原始 PPD 计算公式, 其是在温度范围变化不剧烈时使用, 即当 $R/60 < 0.05$ 时使用, 由于 PPD 的计算是基于 PMV 的, 对 PMV 计算模型做出了改进, 考虑了地铁车站公共区乘客衣着状态与活动状态的时空变化特性, 因此对于 PPD 的计算也相当于考虑了这两点。第二部分为改进后的 PPD 计算公式, 其在温度较为剧烈时使用, 即 $R/60 \geq 0.05$, 其不仅考虑了乘客衣着状态与活动状态的时空变化特性, 同时也考虑了空气温度的剧烈变化情况, 综合而言, EPPD 计算模型具有较好的普适性。

$$EPPD = \begin{cases} PPD, & \frac{R}{60} < 0.05 \\ PPD - 7.35e, & \frac{R}{60} \geq 0.05 \end{cases} \quad (15)$$

5 神经网络舒适性预测

基于改进的 PMV-PPD 计算模型以及现场采集得到的环境参数计算得出环境不满意百分数, 基于计算所得的环境不满意百分数训练 LSTM 长短期记忆网络, 采用训练好的 LSTM 长短期记忆网络对现场环境舒适度进行预测, 从而实现现场环境舒适性的提前预测, 为地铁环境的动态预测自主调控做好环境舒适性预测上的准备。

LSTM 长短期记忆网络是一种门控循环神经网络, 其引入了网络遗忘机制, 采用循环连接的单元替代隐藏单元, 具有输入门、遗忘门和输出门, 从而实现了信息的控制与计算, 图 6 给出了 LSTM 的网络结构图。输入门在 t 时刻的计算公式如式(16)所示。

$$I_t = \sigma(W_i X + b_i) \quad (16)$$

式(16)中: I_t 为输入门; W_i 为输入门权重矩阵; b_i 为偏置; X 为 t 时刻输入。

遗忘门 F_t 在 t 时刻的计算公式如式(17)所示。

$$F_t = \sigma(W_f X + b_f) \quad (17)$$

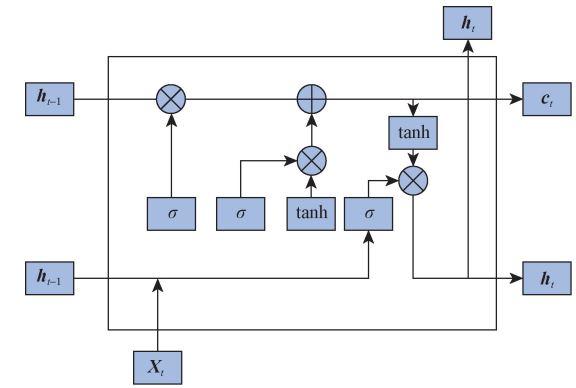
式(17)中: W_f 为遗忘门权重矩阵; b_f 为遗忘门偏置。

输出门 O_t 在 t 时刻的计算公式如式(18)所示。

$$O_t = \sigma(W_o X + b_o) \quad (18)$$

式(18)中: W_o 为输出门权重矩阵; b_o 为输出门偏置。

图 7 为基于舒适性指标与神经网络的车站环境动态预测自主调控系统, 其也是现在地铁环境调控系统的发展方向。现场的终端传感器在监测到环境参数后, 如空气温度、空气相对湿度等, 将数据通



σ 为 sigmoid 函数; tanh 为激活函数; “+”代表加法运算; “x”代表乘法运算; h_t 为当前单元在 t 时刻的输出值; h_{t-1} 为上一单元在 t 时刻的输出值; x_t 为 t 时刻的输入; c_t 为 t 时刻记忆单元

图 6 LSTM 神经网络

Fig. 6 LSTM neural network

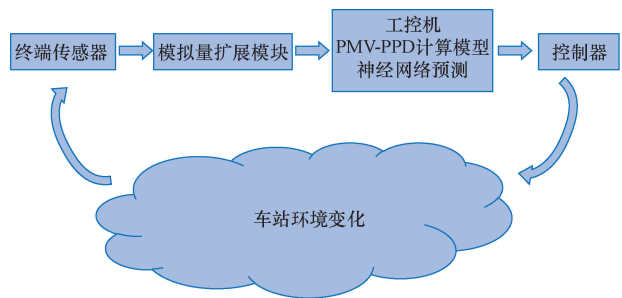


图 7 环境调控系统

Fig. 7 Environmental regulation system

过模拟量传输到模拟量扩展模块, 模拟量扩展模块将终端传感器数据收集, 并采用通信方式发送给工控机, 基于工控机上改进的 PMV-PPD 模型计算出当前乘客的环境不满意度, 并基于 LSTM 神经网络进行环境舒适性预测, 基于预测的结果进行车站环境的控制, 从而改进车站的环境, 实现自主闭环控制。

目前, 大部分地铁车站仍然采用的是开环环境调控, 但地铁环境调控系统会逐渐朝向自主闭环控制方向发展, 因此采用神经网络的方式预测地铁车站环境变化, 从而实现提前调控, 具有较好的意义。

6 环境舒适性分析

经现场实际调研, 对于表 2 中的不同活动状态, 站台乘客所占的比例约为 0:4:1, 乘客新陈代谢率的加权平均值为 121.0。对于表 3 中的 3 种类型的服装穿着, 站台乘客的所占比例约为 1:3:1, 服装热阻加权平均为 0.51, 基于车站实测数据、改进 PMV-PPD 计算模型及训练 LSTM 神经网络, 用以分析地铁车站的环境舒适性及可预测性。

图 8 给出了站台监测点 06:00—24:00 的空气

温度,可以看出,当时间一定时,不同监测点处的空气温度差值较大,最大差值为7℃左右,可见考虑空气温度剧烈变化对乘客舒适性的影响是十分有必要的。当监测点固定时,随着时间的变化,温度成波动状态,波动最大为2℃左右,在地铁运营时间段内温度整体处于稳定状态。

图9给出了站台监测点06:00—24:00的相对湿度,可以看出,当时间一定时,不同监测点处的空气相对湿度不同,最大相对湿度差值可达15%左右,站的空间布局、人员流动及空气温度皆会对相对湿度产生影响。当监测点固定时,06:00—16:00的相对湿度随着时间的增大整体趋势逐渐降低。16:00—23:00的相对湿度随着时间的增大整体趋势缓慢增大,23:00—24:00的相对湿度急剧上升,这是由空气温度下降所导致的。监测点最高相对湿度可达60%左右,最低相对湿度可达36%左右。

得到各监测点的环境参数后,便可进行PMV的计算,图10分别基于传统PMV计算模型及改进的

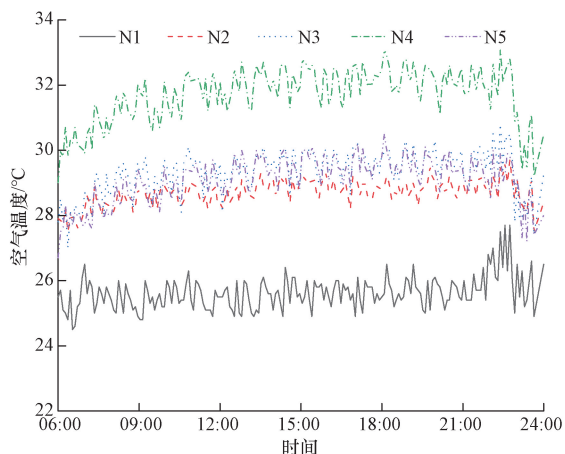


图8 监测点空气温度

Fig. 8 Air temperature at monitoring points

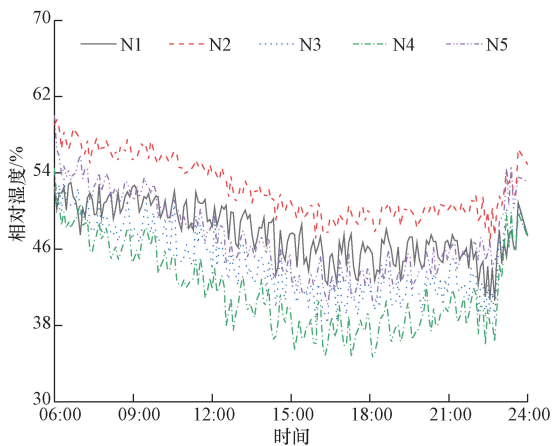
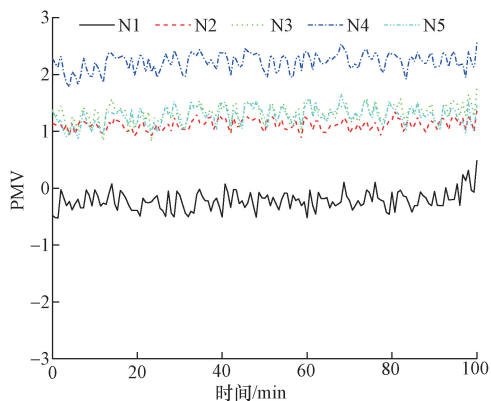
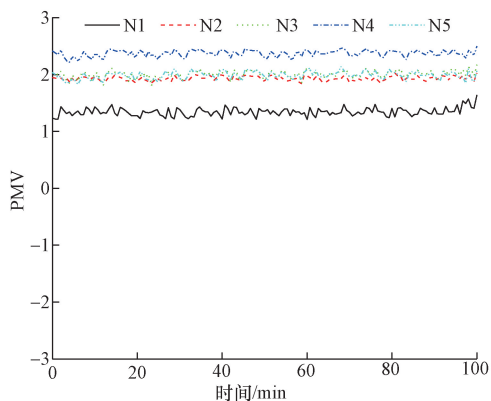


图9 监测点空气相对湿度

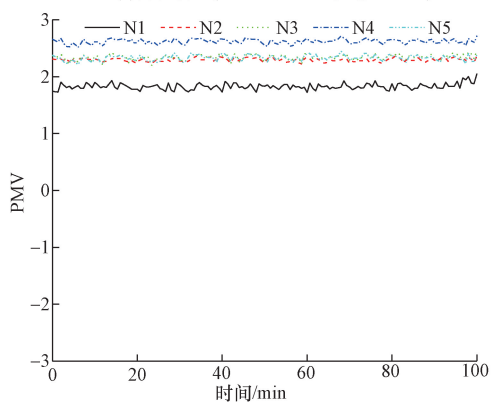
Fig. 9 Air humidity at the monitoring points



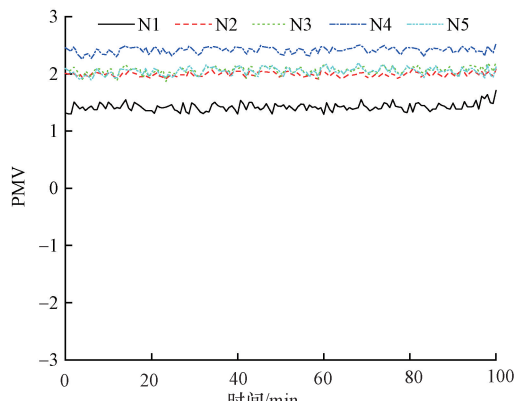
(a)传统模型($M=58.15 \text{ W/m}^2$, $I_{cl}=0.35 \text{ clo}$)



(b)传统模型($M=116.3 \text{ W/m}^2$, $I_{cl}=0.5 \text{ clo}$)



(c)传统模型($M=139.56 \text{ W/m}^2$, $I_{cl}=0.7 \text{ clo}$)



(d)改进模型($M=121 \text{ W/m}^2$, $I_{cl}=0.51 \text{ clo}$)

图10 PMV值

Fig. 10 PMV value

PMV 计算模型给出了计算所得的 PMV 值,从图 10 可以看出,当时间固定时,各监测点的 PMV 值有所不同,最大差值可达 2 左右,这是因为监测点处的空气温度以及相对湿度不同导致的。当监测点固定时,PMV 呈现波动变化,但整体较为稳定。图 10(a)~图 10(c)为传统 PMV 计算模型所得的 PMV,图 10(d)为改进 PMV 模型所得的 PMV,对比可以看出,传统 PMV 计算模型计算所得的 PMV 不具有普适性,而改进后的 PMV 计算模型计算所得的 PMV 具有一定的普适性。

得到各监测点的 PMV 后,便可进行 PPD 的计算,图 11 给出了各监测点的 PPD,可以看出,当时间固定时,各监测点的 PPD 有所不同,最大差值可达 60% 左右,当监测点固定时,PPD 呈现波动变化,但整体较为稳定。图 11(a)~图 11(c)为传统 PPD 计算模型所得的 PPD,图 11(d)为改进 PPD 模型所得的 PPD,对比可以看出,传统 PPD 计算模型计算所得的 PPD 不具有普适性,而改进后的 PPD 计算模型计算所得的 PPD 具有一定的普适性,且其考虑了温度大幅度变化的情况,较为适合站台这种温度空间分布不均的环境。

图 12 给出了神经网络预测值与实际值的对比,图 12(a)中改进 PMV 为基于改进 PMV 模型所计算的 PMV,LSTM 预测为基于神经网络所得的 PMV 预测值,从图 12(a)可以看出,神经网络可以较好地对比 PMV 进行预测,实际值与预测值的最大误差为 8%。图 12(b)中改进 PPD 为基于改进 PPD 模型所计算的 PPD,LSTM 预测为基于预测所得的 PMV 及改进 PPD 模型计算所得的 PPD,从图 12(b)可以看出,神经网络可以很好地对比 PPD 进行预测,实际值与预测值的最大误差为 14%。

7 结论

基于车站公共区传感器实测环境数据与 PMV-PPD 舒适性指标计算模型,研究不同环境参数对舒适度的权重占比,考虑乘客活动状态与衣着状态的时空特性,改进了 PMV 计算模型,考虑温度大幅度变化的情况,改进了 PPD 计算模型,基于 LSTM 长短期记忆神经网络预测了车站公共区环境舒适度,为地铁环境自动化闭环预测调控系统的发展提供了理论支撑,所得结论主要如下。

(1) 乘客新陈代谢率、空气温度、服装热阻、相对湿度对环境舒适度的影响程度依次降低,其所占权重分别为 0.558、0.260、0.113、0.069。

(2) 当时间一定时,站台不同监测点处的空气温度最大差值为 7℃ 左右,当监测点固定时,随着时间的变化,温度成波动状态,波动最大为 2℃ 左右。

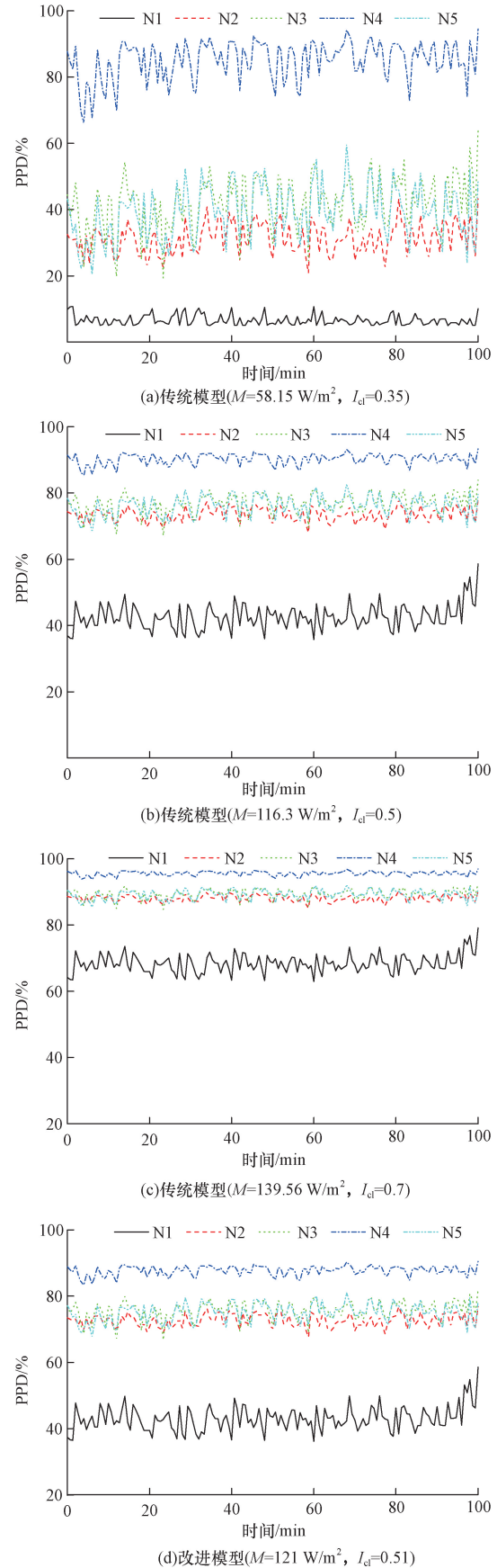


图 11 PPD 值

Fig. 11 PPD value

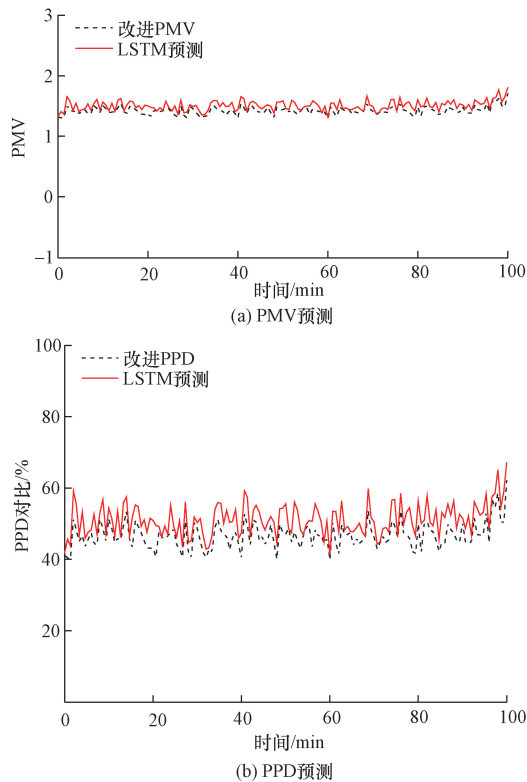


图 12 神经网络预测

Fig. 12 Neural network prediction

(3) 当时间一定时,不同监测点处的空气相对湿度最大差值可达 15% 左右,当监测点固定时,一天内监测点最高相对湿度可达 60% 左右,最低相对湿度可达 36% 左右。

(4) 当时间固定时,各监测点的 PMV 最大差值可达 2 左右,改进后的 PMV 计算模型相对于传统 PMV 计算模型所得的 PMV 值更具有普适性。

(5) 当时间固定时,各监测点的 PPD 最大差值可达 60% 左右,改进后的 PPD 计算模型考虑了温度剧烈的情况,更适用于温度变化范围较大环境下的环境不满意度计算。

(6) 神经网络可以较好地对比 PMV 及 PPD 进行预测,PMV 实际值与预测值的最大误差为 8%,PPD 实际值与预测值的最大误差为 14%。

参 考 文 献

- [1] Yang B W, Yang C L, Ni L, et al. Investigation on thermal environment of subway stations in severe cold region of China: a case study in Harbin [J]. *Building and Environment*, 2022, 212: 208761.
- [2] Xu J, Xiang Z R, Zhi J Y, et al. Assessment of visual comfort in the lighting environments of subway cabins in China[J]. *International Journal of Rail Transportation*, 2022, 11(3): 402-467.
- [3] Peng Y L, Gao Z, Ding W W, et al. Application of computational fluid dynamics in subway environment without fire and smoke: literature review[J]. *Building and Environment*, 2021, 206: 108408.
- [4] Liu Z Y, Long Y, Yang T Z. Research on air supply volume and temperature control of subway trains based on passenger capacity [J]. *Atmosphere*, 2023, 14(2): 258.
- [5] Ren C, Chen H F, Wang J Q, et al. Ventilation impacts on infection risk mitigation, improvement of environmental quality and energy efficiency for subway carriages[J]. *Building and Environment*, 2022, 222: 109358.
- [6] Katavoutas G, Assimakopoulos M N, Assimakopoulos D N. On the determination of the thermal comfort conditions of a metropolitan city underground railway[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 566: 877-887.
- [7] 向清河, 康伟, 朱启文, 等. 车辆空调送风方式对车辆客室热舒适性的影响[J]. *城市轨道交通研究*, 2019, 22(12): 76-80. Xiang Qinghe, Kang wei, Zhu Qiwen, et al. Influence of vehicle air-conditioning ventilation mode on carriage thermal comfort [J]. *Urban Mass Transit*, 2019, 22(12): 76-80.
- [8] 陈阳, 徐峻, 臧建彬, 等. 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[J]. *城市轨道交通研究*, 2022, 25(12): 167-170. Chen Yang, Xu Jun, Zang Jianbin, et al. Thermal comfort analysis of metro train compartment under air-conditioning setting mode of one train with multiple temperatures [J]. *Urban Mass Transit*, 2022, 25(12): 167-170.
- [9] 张帅, 余隋怀, 陈登凯, 等. 载人潜水器深海作业舱室热舒适性分析[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2019, 51(4): 33-39. Zhang Shuai, Yu Suihua, Chen Dengkai, et al. Thermal comfort analysis of deep-sea operating cabin of manned submersible [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2019, 51(4): 33-39.
- [10] 王丽娜. 基于实际数据的地铁站动态环境热适应性研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2020. Wang Lina. Thermal adaptation of dynamic environments in subway station based on practical data[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2020.
- [11] 王高羊. 基于机器学习的高铁站空调系统控制策略研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2022. Wang Gaoyang. Research on control strategy of air conditioning system of high-speed railway station based on machine learning [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2022.
- [12] 赖森华, 陈春俊, 闫磊, 等. 基于层次分析法的地铁列车乘客综合舒适度评价体系[J]. *科学技术与工程*, 2019, 19(36): 296-301. Lai Senhua, Chen Chunjun, Yan Lei, et al. Comprehensive comfort evaluation system of metro passenger based on analytic hierarchy process[J]. *Science Technology and Engineering*, 2019, 19(36): 296-301.
- [13] 那寒鑫, 李夕兵, 马春德. 改进的层次分析法-模糊数学模型在矿井人体舒适度评价中的应用[J]. *安全与环境学报*, 2015, 15(4): 12-16. Na Hanchu, Li Xibing, Ma Chunde. Application of the modified AHP-fuzzy method to the assessment of the mining personal comfort degree[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2015, 15(4): 12-16.
- [14] Zhang F, de Dear R, Candido C. Thermal comfort during temperature cycles induced by direct load control strategies of peak electricity demand management [J]. *Building and Environment*, 2016, 103: 9-20.