文章编号:1673-0291(2026)01-0163-10 DOI:10.11860/j.issn.1673-0291.20250078

地铁车站公共区环境舒适度可靠性分析

祝瑞男[1],陈卓雅[2],毛 军[2],赵明珠[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 100000)

摘 要:为研究地铁车站公共区的环境舒适性,基于现场实测数据获得环境参数的变化规律,结合车站乘客衣着状态及活动状态的变化特性,提出改进预计平均热感觉指数(Predicted Mean Vote,PMV)计算模型,考虑环境温度的突变特性,改进预计不满意百分数(Predicted Percent Dissatisfied,PPD)计算模型,并在改进的PMV-PPD计算模型基础上分析车站的环境舒适度,利用灵敏度分析方法研究PMV及PPD对环境参数的灵敏度,最后基于可靠性方法,将乘客的新陈代谢率及服装热阻建模为随机变量,建立车站环境舒适度可靠性评估模型,分析车站环境的舒适度可靠性.研究结果表明:当监测点位置固定时,PMV及PPD值会围绕一个稳定数值上下波动,改进后的PMV-PPD计算模型相对于传统PMV-PPD计算模型更具有一定的普适性;当新陈代谢率和服装热阻一定时,PMV对空气温度的灵敏度随着空气温度的升高先降低后增大,当新陈代谢率为58.15,服装热阻为0.35、0.5、0.7时,随着温度的变化,PMV对空气温度的灵敏度最低点皆为0,最高点依次为0.278、0.243、0.204;当新陈代谢率为58.15时,随着空气温度的升高,系统失效概率逐渐降低,当新陈代谢率为116.3、139.56时,随着空气温度的升高,系统的失效概率逐渐增大.

关键词:地铁车站;PMV;PPD;灵敏度;失效概率
中图分类号:TU831.3 **文献标志码**:A

Reliability analysis of environmental comfort in public areas of subway stations

ZHU Ruinan[1], *CHEN Zhuoya*[2], *MAO Jun*[2], *ZHAO Mingzhu*[1], *LIU Zheng*[3]
(1.Beijing Subway Operation Co., Ltd., Beijing 100040, China;
2.School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;
3.Aerospace Macro Information Technology Beijing Co., Ltd., Beijing 100000, China)

Abstract: To investigate the environmental comfort of public areas in subway stations, this study analyzes the variation laws of environmental parameters based on on-site field measurements. Accounting for the variability in passengers' clothing insulation and activity levels, an improved Predicted Mean Vote (PMV) calculation model is proposed. Additionally, the Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD) model is refined to incorporate the characteristics of sudden ambient temperature changes.

收稿日期:2025-06-04;**修回日期**:2025-11-23
基金项目:国家自然科学基金(52172336);北京市地铁运营有限公司科技项目(JC2022WN-03, C22GY00210)
Foundation items: National Natural Science Foundation of China(52172336); Science and Technology Project of Beijing Metro Operation Co., Ltd.(JC2022WN-03, C22GY00210)
第一作者:祝瑞男(1992—),女,北京市人,高级工程师.研究方向为地铁机电设备运行安全. **email**: zhuruinan@126.com.
通信作者:陈卓雅(2001—),女,湖南湘潭人,硕士生. **email**: 15717325716@163.com.

引用格式:祝瑞男,陈卓雅,毛军,等.地铁车站公共区环境舒适度可靠性分析[J].北京交通大学学报,2026,50(1):163-172.
ZHU Ruinan, CHEN Zhuoya, MAO Jun, et al.Reliability analysis of environmental comfort in public areas of subway stations[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2026, 50(1): 163-172.(in Chinese)

Based on these improved PMV-PPD models, the environmental comfort of the station is evaluated, and the sensitivity of PMV and PPD to environmental parameters is examined using sensitivity analysis. Finally, applying reliability theory, a reliability assessment model for station environmental comfort is established by modeling passenger metabolic rate and clothing thermal resistance as random variables. The results indicate that for fixed monitoring points, PMV and PPD values fluctuate around stable baselines, and the improved PMV-PPD model demonstrates greater applicability compared to the traditional model. With constant metabolic rate and clothing thermal resistance, the sensitivity of PMV to air temperature initially decreases and then increases as air temperature rises. Specifically, when the metabolic rate is 58.15 and clothing thermal resistance is 0.35, 0.5, and 0.7, as temperature changes, the minimum sensitivity of PMV to air temperature is consistently 0, while the maximum sensitivities are 0.278, 0.243, and 0.204, respectively. Furthermore, at a metabolic rate of 58.15, the system failure probability gradually decreases as air temperature increases; conversely, at metabolic rates of 116.3 and 139.56, the failure probability increases with rising air temperature.

Keywords: subway station; PMV; PPD; sensitivity; failure probability

近年来,随着城市化进程的加速,我国地铁线路不断地发展与扩张,地铁作为现代城市交通的重要组成部分,为人们出行提供了快速便捷的方式.由于地铁车站处于半封闭空间,因此环境的舒适性受诸多因素影响,如外部环境、空气流动、人流活动等[1-4],且目前地铁车站环境的调控是开环的,可能会造成能源浪费,因此,为改善乘客的出行体验,保证能源的合理利用,最终实现闭环调控,有必要开展地铁车站公共区环境舒适性及可靠性研究.

目前,国内外学者已在地铁热环境舒适性方面做了大量研究,所做工作主要集中在两个方面:车站环境参数的监测与舒适度指标的建模及计算.在地铁车站环境参数的监测上,主要采用现场实测的方法获取车站某一时刻的环境参数,文献[5]对某地铁车站轨行区的空气温度、热流密度进行实测,得到了站台空气温度、相对湿度、风速及颗粒物浓度等环境参数.文献[6]通过在地铁车站实际环境进行现场测量,结合热舒适问卷调查,获得了不同时段空气温度、相对湿度等热环境参数.文献[7]通过在地铁车站内开展现场环境调查与实测,获得了站厅与站台等不同空间位置的空气温度、相对湿度及典型空气品质等环境参数.在舒适度指标的建模及计算上,通常采用预计平均热感觉指数(Predicted Mean Vote,PMV)与预计不满意百分数(Predicted Percent Dissatisfied,PPD)等模型计算环境舒适性.文献[8]等通过数值模拟方法对车站内的气流流动进行了仿真计算,得到了车站的PMV分布.文献[9]基于Euler方法模拟了车厢内气流的变化,得到了车厢不同空间位置处的PMV分布.文献[10]通过现场实测数据,利用PMV及PPD等舒适度指标计算方法,计算了车站不同空间位置处的舒适度值.文献[11]通过分析PMV-PPD热舒适性指标,计算了最舒适热环境下空气温度与乘客新陈代谢率的关系.文献[12]通过数值模拟计算并分析不同客流条件下站台的PMV与PPD值,对站台呼吸区热环境进行评价.以上对于车站舒适度指标的计算皆是采用传统的PMV-PPD计算模型进行的,没有考虑乘客衣着状态及活动状态随时空的变化特性,也未考虑温度突变对环境舒适度的影响,同时对环境舒适度的可靠性鲜有研究.

基于此,本文以地铁某车站为实测站点,搭建地铁车站公共区环境监测系统,获得环境参数的变化规律,在此基础上,考虑车站乘客衣着状态及活动状态的变化特性,改进预计平均热感觉指数PMV计算模型,考虑环境温度的突变特性,改进预计不满意百分数PPD计算模型,并基于改进的PMV-PPD计算模型分析车站环境的舒适度,利用灵敏度分析方法,研究不同条件下PMV及PPD对空气温度的灵敏度,最后基于可靠性方法,将乘客的新陈代谢率及服装热阻建模为随机变量,建立车站环境舒适度可靠性评估模型,分析车站环境的舒适度可靠性.

1 传感器布局与舒适度指标计算

1.1 传感器空间布局

本文车站公共区舒适性分析选取的目标空间为站台,站台传感器的空间布局应尽量保证均匀,合理的布局能够获取具有代表性的环境数据,从而更准确地分析站台的环境舒适性.站台实际传感器布置如图1所示.图1中:传感器布置空间点位共计13处,均距离站台地面约2.7 m;A1~A5代表站台北侧5个点

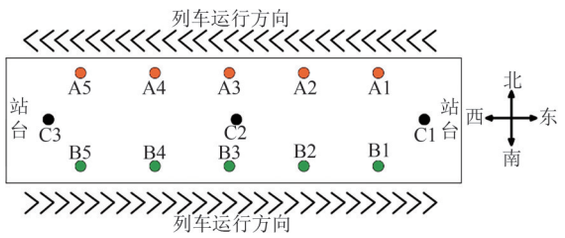


图 1　站台传感器空间布局

Fig.1　Spatial layout of platform sensors

位的传感器;B1~B5分别代表站台南侧5个点位的传感器;C1~C3分别代表站台中央3个点位的传感器.各点位传感器所监测的参数为空气温度、相对湿度,此外,C2点位传感器同步监测黑球温度和风速.

1.2　舒适度指标计算

基于传感器采集到的数据,采用PMV和PPD两个指标对地铁站台环境舒适性进行评估,PMV计算式为[13-14]

$$\begin{aligned}\mathrm{PMV}=&\left[0.303\times\exp(-0.036M)+0.028\right]\times\\&\{M-W-3.05\times10^{-3}\times\left[5\,733-6.99(M-W)-P_{\mathrm{a}}\right]-0.42\times(M-W-58.15)-1.7\times\\&10^{-5}\times M(5\,867-P_{\mathrm{a}})-0.001\,4M\times\\&(34-t_{\mathrm{a}})-3.96\times10^{-8}\times f_{\mathrm{cl}}\left[(t_{\mathrm{cl}}+273)^4-\right.\\&\left.(t_{\mathrm{r}}+273)^4\right]-h_{\mathrm{c}}\times f_{\mathrm{cl}}\times(t_{\mathrm{cl}}-t_{\mathrm{a}})\}\end{aligned}\tag{1}$$

$$\begin{aligned}t_{\mathrm{cl}}=&35.7-0.028(M-W)-I_{\mathrm{cl}}\times\{3.96\times10^{-8}\times\\&f_{\mathrm{cl}}[(t_{\mathrm{cl}}+273)^4-(t_{\mathrm{r}}+273)^4]+f_{\mathrm{cl}}h_{\mathrm{c}}(t_{\mathrm{cl}}-t_{\mathrm{a}})\}\end{aligned}\tag{2}$$

$$h_{\mathrm{c}}=\begin{cases}2.38\times|t_{\mathrm{cl}}-t_{\mathrm{a}}|^{0.25} & 2.38\times|t_{\mathrm{cl}}-t_{\mathrm{a}}|^{0.25}\geqslant12.1\sqrt{v_{\mathrm{ar}}}\\12.1\sqrt{v_{\mathrm{ar}}} & 2.38\times|t_{\mathrm{cl}}-t_{\mathrm{a}}|^{0.25}<12.1\sqrt{v_{\mathrm{ar}}}\end{cases}\tag{3}$$

$$f_{\mathrm{cl}}=\begin{cases}1.00+1.29I_{\mathrm{cl}} & I_{\mathrm{cl}}\leqslant0.078\\1.05+0.645I_{\mathrm{cl}} & I_{\mathrm{cl}}>0.078\end{cases}\tag{4}$$

式中:PMV为预计平均热感觉指数;M为新陈代谢率,W/m^2,当人处于静止休息状态时,人体的新陈代谢率为58.15 W·m^{-2},当人站立或偶尔走动时,人体的新陈代谢率为116.30 W·m^{-2},当人以2 km/h的速度步行时,人体的新陈代谢率为110.49 W·m^{-2},当人以3 km/h的速度步行时,人体的新陈代谢率为139.56 W·m^{-2};W为人体所做的机械功,W/m^2;t_{a}为人体周围空气的温度,℃;t_{r}为黑球温度,℃;P_{a}为人体周围空气的水蒸气分压,Pa;t_{cl}为人体着装后外表面温度,℃;h_c为对流换热系数;v_{ar}为空气流速,m/s;f_{cl}为人体服装面积系数;I_{cl}为服装热阻,m^2·K·W^{-1}.

人体衣着不同,服装热阻不同,服装热阻与人体衣着关系如表1所示[15].

表 1　人体服装热阻

Tab.1　Clothing thermal resistance

服装类型	服装热阻值/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

得到PMV值后,可用其计算预计不满意百分数PPD,计算式为[13].

$$\mathrm{PPD}=100-95\times\exp[-(0.2179\times\mathrm{PMV}^2+0.03353\times\mathrm{PMV}^4)]\tag{5}$$

2　改进PMV-PPD计算模型

传统PMV计算模型未考虑参数的时空性,即同一空间点位在不同时间下的环境舒适性或同一时间下不同点位的环境舒适性是受乘客的新陈代谢率及服装热阻影响的,因此,在处理与乘客相关的参数时,对其进行加权平均较为合适.乘客新陈代谢率的计算式为

$$M=\frac{1}{S}\left(\sum_{k=1}^{S}\boldsymbol{A}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\right)\tag{6}$$

式中:$\boldsymbol{B}$为乘客的新陈代谢率向量$[b_1\ b_2\ \cdots\ b_i]$,W/m^2,$b_i(i=1,2,\cdots,N)$为选取的第i个新陈代谢率,根据人体处于静止休息、站立或偶尔走动、步行3种不同的活动状态下的新陈代谢率,选取的新陈代谢率向量$\boldsymbol{B}$为[58.15 116.3 139.56];$\boldsymbol{A}$为乘客新陈代谢率权重向量$[a_1\ a_2\ \cdots\ a_i]$,$a_i(i=1,2,\cdots,N)$为新陈代谢率权重因子;S为地铁乘客人数.

服装热阻的加权平均的计算式为

$$I_{\mathrm{cl}}=\frac{1}{S}\left(\sum_{k=1}^{S}0.155\times\boldsymbol{C}\boldsymbol{D}^{\mathrm{T}}\right)\tag{7}$$

式中:$\boldsymbol{D}$为人员的服装热阻向量$[d_1\ d_2\ \cdots\ d_j]$,clo,d_j($j=1,2,\cdots,L$)为选取的第j个服装热阻值,取值如表1所示,共计3个,服装热阻向量$\boldsymbol{D}$为[0.35 0.5 0.7];$\boldsymbol{C}$为地铁乘客服装热阻权重向量$[c_1\ c_2\ \cdots\ c_j]$,c_j服装热阻权重因子.

基于改进的PMV计算模型,可计算PPD,但PMV计算模型是在稳态环境下开发的,基于其计算的PPD值并未考虑环境剧烈变化对乘客舒适度的影响,因此本文结合文献[16]的试验数据,对PPD计算模型进行改进,图2为温度条件,包括了温度周期性变化及温度大幅度变化情况,图3为试验过程

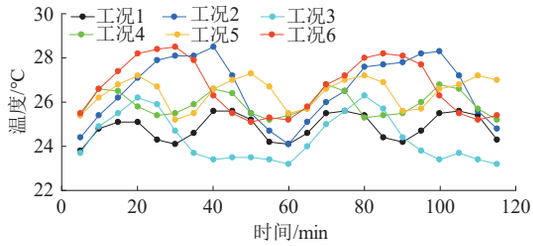
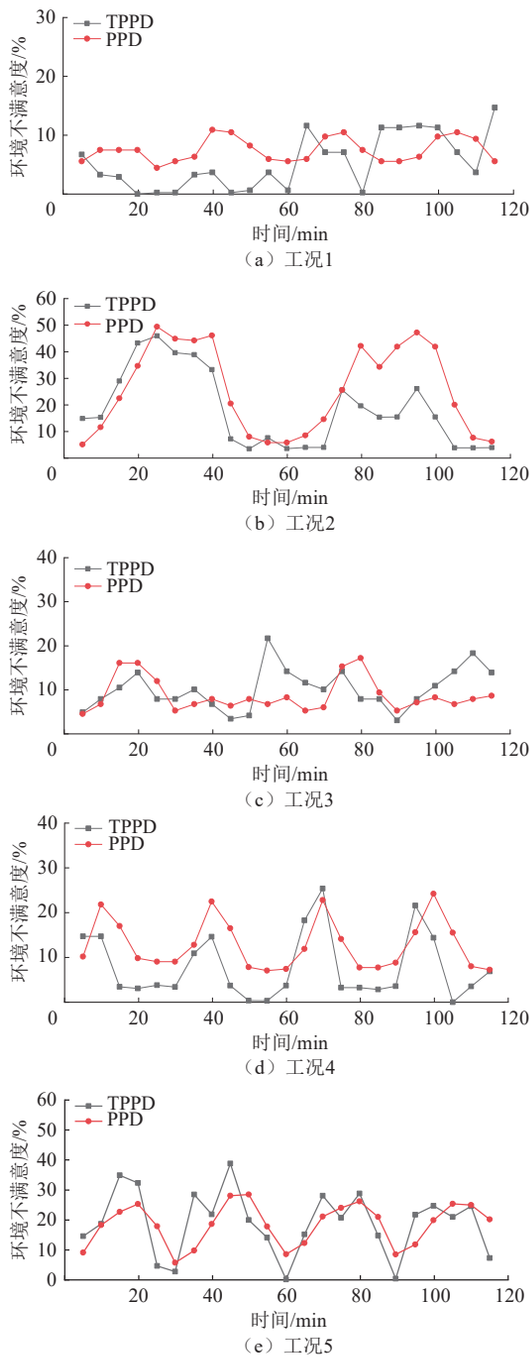


图 2　空气温度条件

Fig.2　Air temperature conditions

中人员的环境不满意度，图 3 中，TPPD 为试验人员的环境不满意度.

改进后的 PPD 计算模型考虑了空气温度的剧烈变化，与实际较为贴切.其计算式为



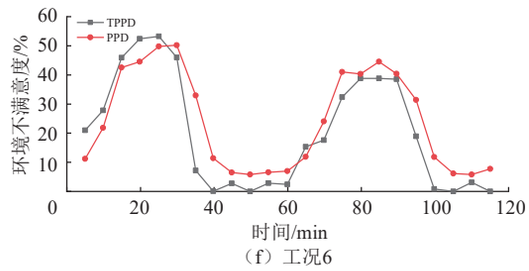


图 3　环境不满意度

Fig.3　Environmental dissatisfaction

$$\mathrm{EPPD}=\begin{cases}\mathrm{PPD} & \dfrac{R}{60}<0.05\\ \mathrm{PPD}-\dfrac{e}{t_2-t_1}\times & \\ \left(\left(\displaystyle\int_{t_1}^{t_2}\mathrm{PPD}\mathrm{d}t\right)-\left(\int_{t_1}^{t_2}\mathrm{TPPD}\mathrm{d}t\right)\right) & \dfrac{R}{60}\geqslant 0.05\end{cases}\tag{8}$$

式中：EPPD 为改进的 PPD 计算模型；R 为 60 min 内乘客所经历环境的空气温度极差，℃；t_1、t_2 分别为试验空气温度的变化周期起始、结束时间；e 为调节因子.

基于文献[16]试验数据，可将式(8)进行进一步简化，简化后得到 EPPD 计算公式为

$$\mathrm{EPPD}=\begin{cases}\mathrm{PPD} & \dfrac{R}{60}<0.05\\ \mathrm{PPD}-7.35e & \dfrac{R}{60}\geqslant 0.05\end{cases}\tag{9}$$

式中，e 取值 0.5.

站台中央点 C2 的风速变化情况见图 4，由图 4 可知：由于站台空调送风口布置于站台两侧，站台中央传感器监测点 C2 距离送风口较远，且送风口风速竖直向下，送风气流在送风口附近迅速衰减，因此站台中央的风速大多时间为 0，偶尔会有波动，波动原因为受到活塞风的影响，后续计算 PMV 值时，将风速考虑为零进行计算.

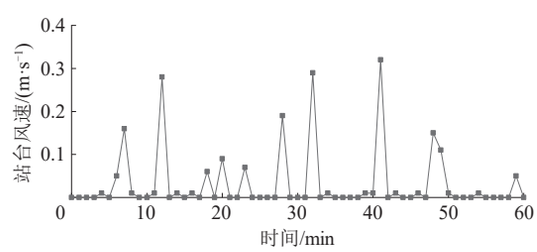


图 4　站台风速

Fig.4　Platform air velocity

3　环境舒适性灵敏度及可靠性

3.1　舒适性灵敏度

灵敏度分析是研究 1 个系统的输出变化对系统

参数敏感程度的方法,通过灵敏度分析可以判断出哪些参数对系统或模型有较大的影响,因此,采用零灵敏度方法分析车站环境各参数对舒适度的影响较好,其计算式为

$$\mathrm{rs}=\frac{\partial \mathrm{PMV}}{\partial \mathrm{par}} \tag{10}$$

$$\mathrm{ks}=\frac{\partial \mathrm{PPD}}{\partial \mathrm{par}} \tag{11}$$

式中:rs、ks分别为PMV、PPD对环境参数的灵敏度计算结果;par为环境参数.

3.2　系统功能函数

对于车站站台同一位置处,其不同时间乘客的服装热阻及活动状态是不同的,具有随机性,虽改进的PMV-PPD计算模型给出了1个普适性的计算结果,但并未给出实际的舒适性统计概率,本文考虑乘客服装热阻及活动状态的随机性,对现场环境的舒适性做出可靠性评估.

可靠性评估的前提是根据人体7个等级热感觉,建立系统的功能函数.当$Z(\boldsymbol{X})>0$时,认为此时环境处于可接受的状态;当$Z(\boldsymbol{X})<0$时,认为此时环境处于不可接受的状态;当$Z(\boldsymbol{X})=0$时,认为此时环境处于极限状态.系统功能函数为

$$Z(\boldsymbol{X})=U-|\mathrm{PMV}(\boldsymbol{X})| \tag{12}$$

式中:U为理想PMV值,后续计算时U的取值选为1.5;$\boldsymbol{X}$为系统随机向量,本文选取乘客的服装热阻以及活动状态作为其分量,并认为各分量分别服正态分布:$X_w\sim\mathcal{N}\left(\mu_w,(0.1\mu_w)^2\right)$,$w=1,2$,其中$\mu_w$为第$w$个随机变量的标称值.

3.3　Monte Carlo可靠性模拟

在进行车站环境舒适性可靠性计算时,系统失效概率计算式为

$$P_f=\int_F f_X(\boldsymbol{X})\mathrm{d}\boldsymbol{X} \tag{13}$$

式中:P_f为系统失效概率;F为失效域,表示$Z(\boldsymbol{X})\leqslant 0$的范围,$\boldsymbol{X}=(x_1,x_2,\cdots,x_n)$,$n$为系统随机变量个数,本文$n$为2;$f_X(\boldsymbol{X})$为系统随机向量$\boldsymbol{X}$的联合概率密度函数.

用系统失效域指示函数的数学期望表征系统联合概率密度函数在失效域中的积分,表达式为

$$P_f=E\left[I_F(\boldsymbol{X})\right] \tag{14}$$

其中,失效域指示函数定义为

$$I_F(\boldsymbol{X})=\begin{cases}1 & \boldsymbol{X}\in F\\ 0 & \boldsymbol{X}\notin F\end{cases} \tag{15}$$

式中,$E[\cdot]$为数学期望算子.

Monte Carlo模拟方法本质上是用失效域指示函数的样本均值来近似失效域指示函数的数学期望,首先从系统随机变量的联合概率密度函数中抽取Q个样本点,然后统计其落入失效域内的样本数量,落入失效域中的样本数量与总样本数量的比值即为失效概率的估计值,当计算的样本数量足够大时,失效概率的估计值便会收敛,由此可得到精确的失效概率,即式(14)可转化为

$$P_f=\frac{1}{Q}\sum_{l=1}^{Q}I_F(x_l) \tag{16}$$

式中:$x_l(l=1,2,\cdots,Q)$表示基于系统随机变量的联合概率密度函数抽取的第l个样本点;Q表示基于系统随机变量的联合概率密度函数抽取的样本点总数量.

4　计算结果分析

经现场实际调研,站台乘客活动状态为静止休息状态、站立或偶尔走动状态及以3 km/h的速度步行状态所占的比例约为0∶4∶1,乘客新陈代谢率的加权平均值为121.0.对于表1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,基于现场传感器实测数据及改进的PMV-PPD计算模型研究站台环境的舒适性,在此基础上利用局部灵敏度分析方法,研究各环境参数对PMV及PPD值的灵敏度,最后基于可靠性评估方法,评估站台环境的舒适度可靠性.

地铁站台一天内13个监测点的空气温度变化曲线见图5,由图5可知:当时间一定时,不同空间位置的温度存在一定差异,这是由地铁内部空间布局导致的;当空间位置固定时,随着时间的变化,站台温度一直处于波动状态,南北两侧的空气温度波动幅度相对较大,最高可达约2℃,中间的温度波动幅度相对较小.

地铁站台一天内13个监测点的湿度变化曲线见图6,由图6可知:①当时间一定时,空间位置不同,湿度有所不同,湿度最大差值可达约15%;当空间位置一定时,站台南北两侧的监测点的湿度随着时间的变化波动相对较大,波动最大幅度约为10%,站台中部监测点的湿度波动较小.②站台北侧及站台南侧监测点的空气湿度约在5∶00开始变大,约9∶00时增大到最大值,这是因为约5∶00时地铁空调设施开启,周围空气逐渐变冷,导致湿度逐渐增大;湿度从0∶00至5∶00的变化过程中波动较小,5∶00至24∶00的变化过程中波动较大,这是因为湿度的大小受到列车活塞风及送风口的综合影响导致的.③站台中部监测点的空气湿度变化程度没有南北侧大,这是因为站

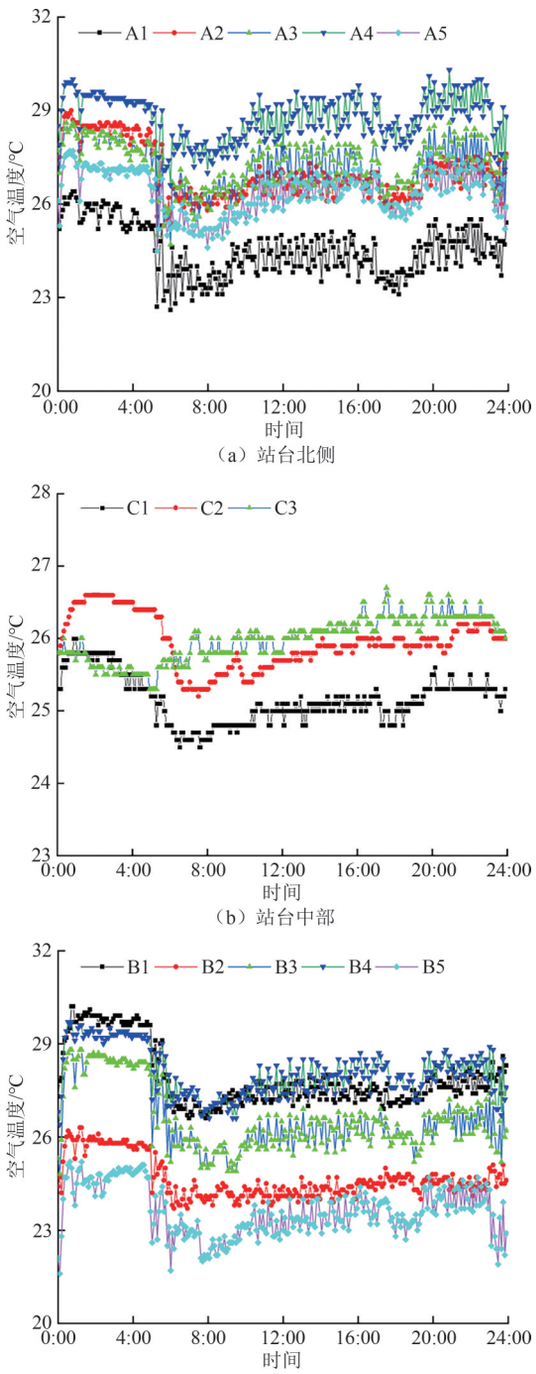


图 5　监测点空气温度

Fig.5　Air temperature at monitoring points

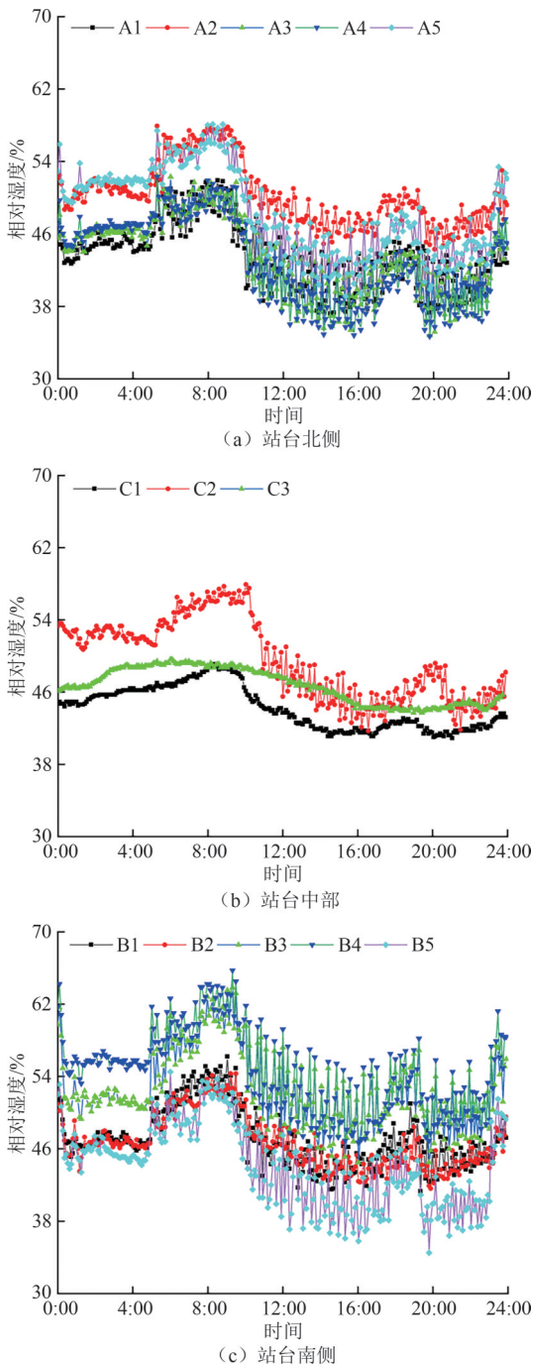


图 6　监测点空气湿度

Fig.6　Air humidity at the monitoring points

台中部受活塞风和送风口的影响相对较小.

站台中部监测点的黑球温度见图 7,由图 7 可知:黑球温度变化不大,这是因为站台的空调送风口位于南北两侧,离中部监测点有一定距离,空调风很难到达站台中部,从而导致站台的黑球温度的变化不大;黑球温度的波动也不大,整体处于一个稳定状态.

图 8 以站台北侧监测点为例,基于原始 PMV 计算模型及改进 PMV 计算模型给出了不同监测点的 PMV 计算值.由图 8 可知:①当时间固定时,各监测点的 PMV 值有所区别,最大差值可达约 2;当监测点固定时,PMV 值会围绕着一个稳定状态上下波动.② $W=58.15$ 与 $I_{cl}=0.35$, $W=116.3$ 与 $I_{cl}=0.35$, $W=139.56$ 与 $I_{cl}=0.7$ 三组的 PMV 值是基于传统 PMV 计算模型所得的, $W=121$ 与 $I_{cl}=0.51$ 的 PMV 值是基于改进 PMV 计算模型所得的,两者对比可知,传统 PMV 计算模型计算所得的 PMV 值普适性偏低,而改进后的 PMV 计算模型计算所得的 PMV 值更具有一定的普适性.

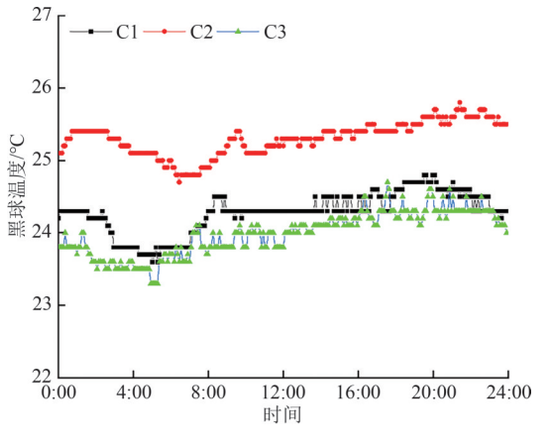
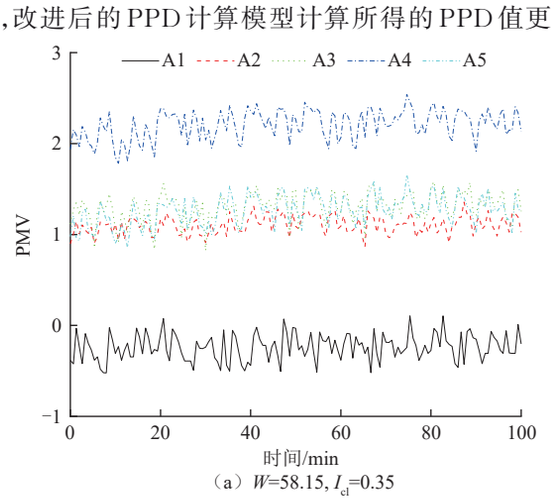


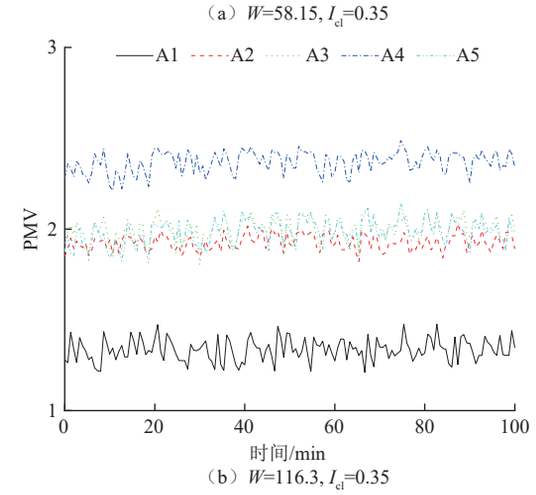
图 7　黑球温度

Fig.7　Black globe temperature

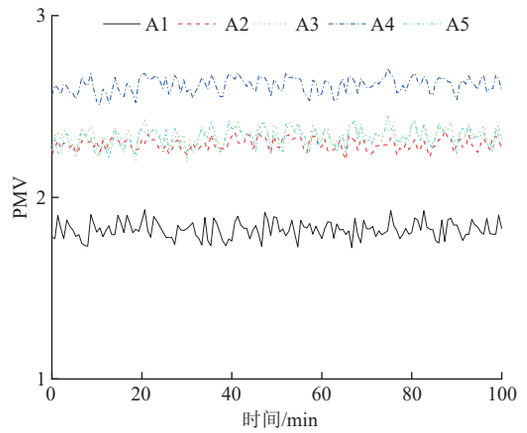
图 9 以站台北侧监测点为例,基于原始 PPD 计算模型及改进 PPD 计算模型给出了不同监测点的 PPD 计算值.由图 9 可知:①当时间固定时,各监测点的 PPD 值有所区别,最大差值可达约 60%;当监测点固定时,PPD 值会围绕着一个稳定状态上下波动.② W=58.15 与 I_{cl}=0.35, W=116.3 与 I_{cl}=0.35, W=139.56 与 I_{cl}=0.7 三组的 PPD 值是基于传统 PPD 计算模型所得的, W=121 与 I_{cl}=0.51 的 PPD 值是基于改进 PPD 计算模型所得的,两者对比可知,改进后的 PPD 计算模型计算所得的 PPD 值更具有一定的普适性,其对乘客衣着状态及活动状态进行了综合加权处理,同时也考虑了温度剧烈变化对 PPD 的影响.



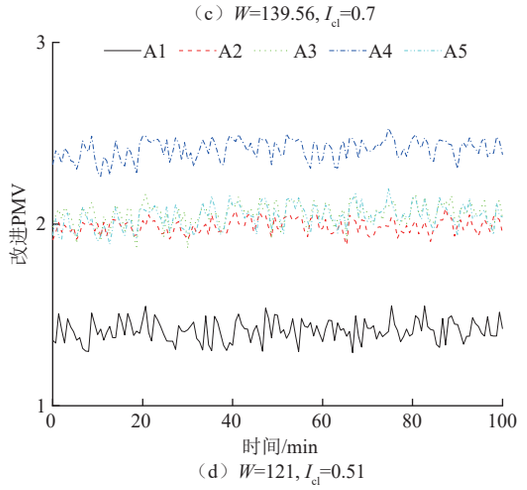
（a）W=58.15, I_{cl}=0.35



（b）W=116.3, I_{cl}=0.35



（c）W=139.56, I_{cl}=0.7

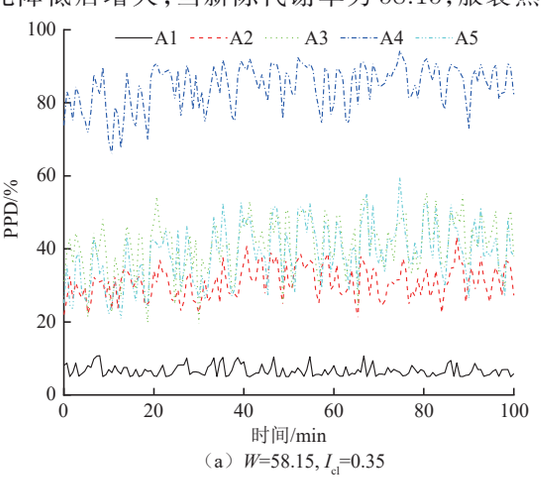


（d）W=121, I_{cl}=0.51

图 8　PMV 值

Fig.8　PMV values

图 10 基于监测点测得的实际数据,选取黑球温度 25 ℃、风速 0、湿度 45% 为例,给出了乘客在不同新陈代谢率、不同服装热阻下,PMV 对空气温度的灵敏度.由图 10 可知:当新陈代谢率和服装热阻一定时,PMV 对空气温度的灵敏度随着空气温度的升高先降低后增大;当新陈代谢率为 58.15,服装热阻



（a）W=58.15, I_{cl}=0.35

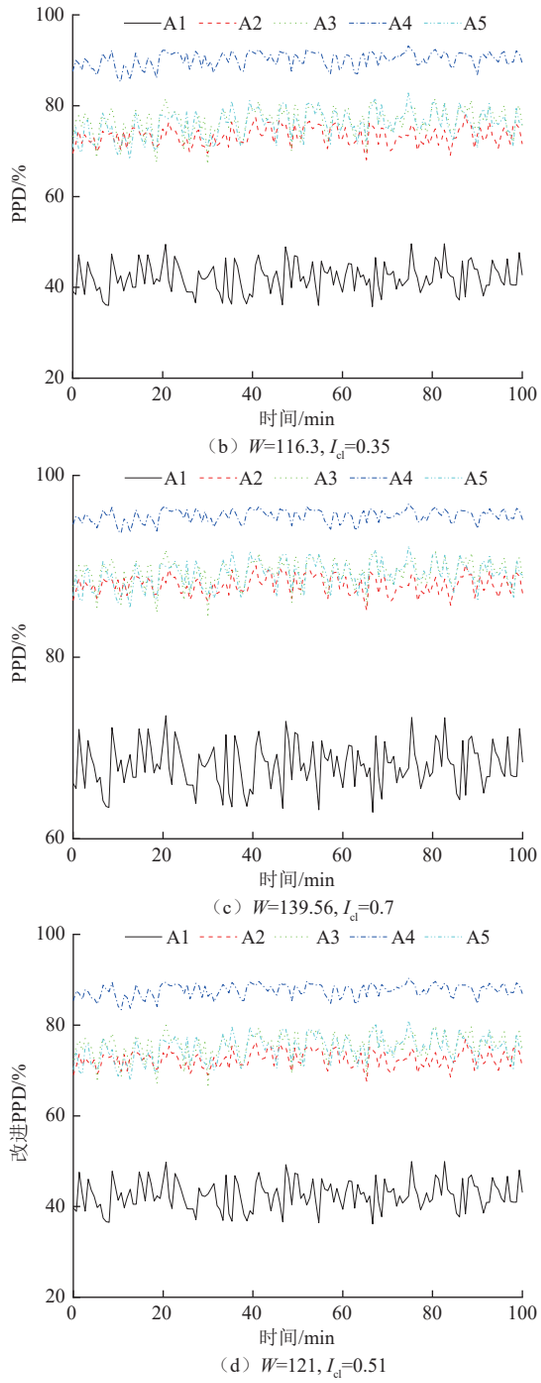


图 9 PPD 值

Fig.9 PPD values

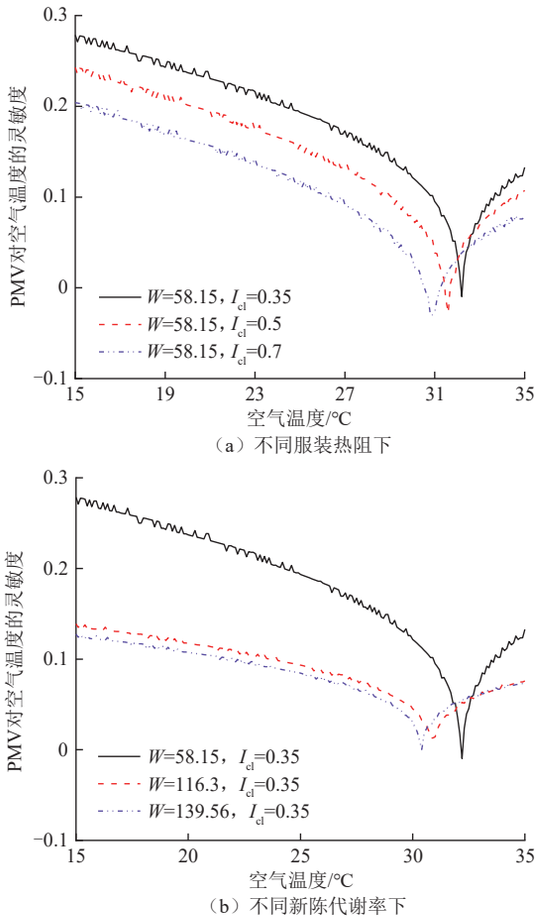


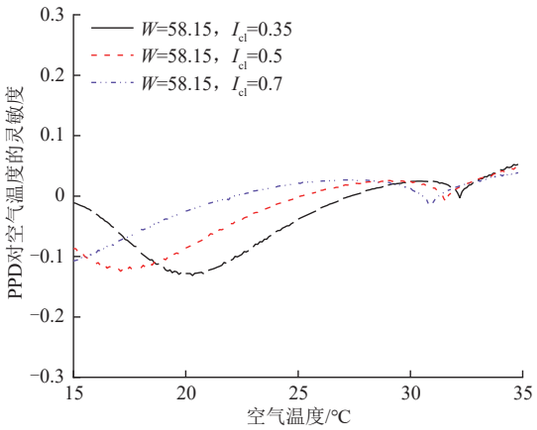
图 10 PMV 对空气温度的灵敏度

Fig.10 Sensitivity of PMV to air temperature

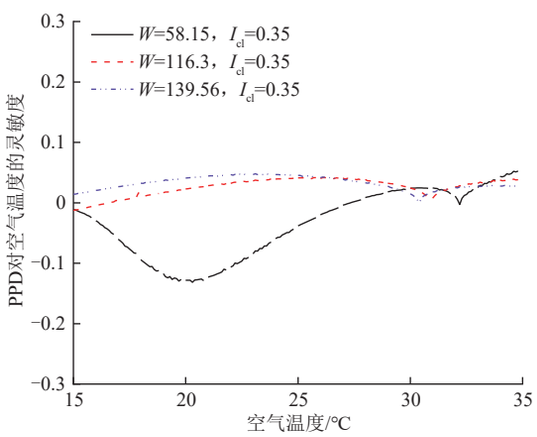
为 0.35、0.5、0.7 时，随着温度的变化，三者对应的灵敏度最低点皆为 0，最高点依次为 0.278、0.243、0.204；当新陈代谢率一定，空气温度在 15 ℃～31 ℃与 33 ℃～35 ℃时，灵敏度随着服装热阻的增大而降低，空气温度在 31 ℃～33 ℃时，灵敏度随着服装热阻的变化呈现相互交叉状态；当服装热阻为 0.35，新陈代谢率为 58.15、116.3、139.56 时，三者对应的灵敏度最低点皆为 0，最高点依次为 0.278、0.138、0.127；当服装热阻一定，且空气温度达到 31 ℃～33 ℃时，灵敏度随着新陈代谢率的增大而降低，31 ℃～35 ℃时，灵敏度随着新陈代谢率的变化呈现相互交叉状态.

以黑球温度 25 ℃、风速 0、湿度 45% 为例，乘客在不同新陈代谢率、不同服装热阻下，PPD 对空气温度的灵敏度见图 11. 由图 11 可知：当新陈代谢率为 58.15，服装热阻为 0.35、0.5、0.7 时，随着温度的变化，三者对应的灵敏度最低点皆为 0，最高点依次为 0.132、0.121、0.107；当服装热阻为 0.35，新陈代谢率为 58.15、116.3、139.56 时，随着温度的变化，三者对应的灵敏度最低点皆为 0，最高点依次为 0.132、0.042、0.048.

以黑球温度 25 ℃、风速 0、湿度 45% 为例，乘客在不同新陈代谢率、不同服装热阻下系统的失效概率，即 PMV＞1.5 时的概率见图 12. 由图 12 可知：当新陈代谢率为 58.15 时，随着空气温度的升高，系统失效概率逐渐降低；当新陈代谢率为 116.3 及 139.56 时，随着空气温度的升高，系统的失效概率逐渐增大；当新陈代谢率为 58.15、服装热阻分别为 0.35、0.5 及 0.7 时，随着空气温度的变



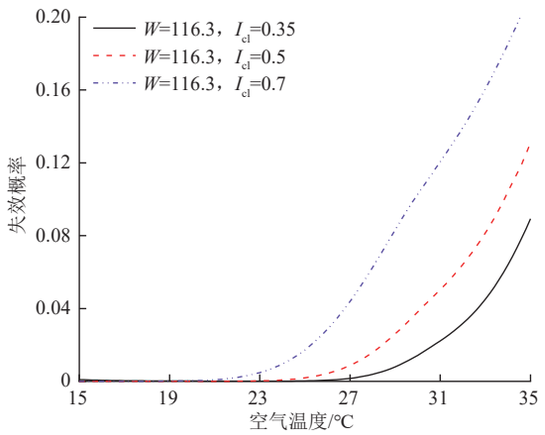
（a）不同服装热阻下



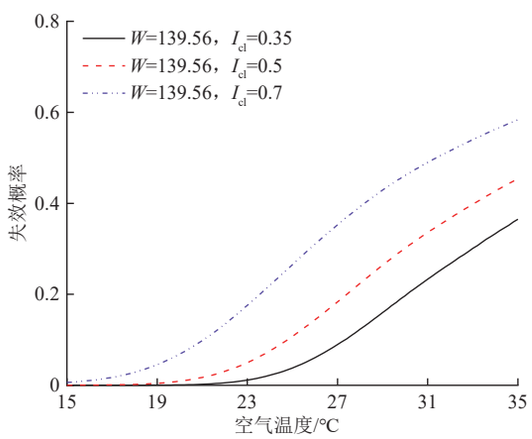
（b）不同新陈代谢率下

图 11　PPD 对空气温度的灵敏度

Fig.11　Sensitivity of PPD to air temperature



（b）W=116.3

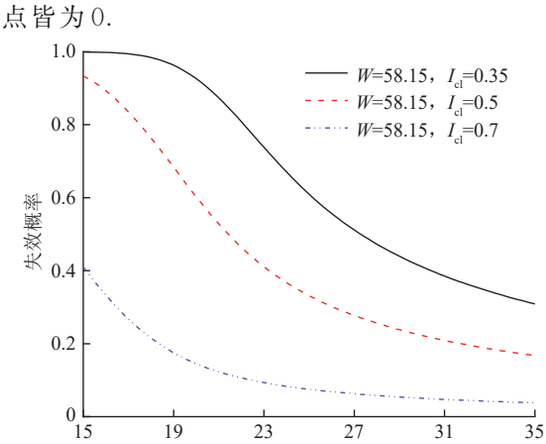


（c）W=139.56

图 12　失效概率

Fig.12　Failure probability

化,失效概率最高点分别为 1、0.933、0.410,最低点分别为 0.309、0.167、0.038;当新陈代谢率为 116.3,服装热阻分别为 0.35、0.5 及 0.7 时,随着空气温度的变化,失效概率最高点分别为 0.089、0.131、0.212,最低点皆为 0;当新陈代谢率为 139.56,服装热阻分别为 0.35、0.5 及 0.7 时,随着空气温度的变化,失效概率最高点分别为 0.365、0.454、0.583,最低点皆为 0.



（a）W=58.15

5　结论

1）当监测点固定时,PMV 及 PPD 值会围绕一个数值上下波动,但整体处于稳定状态,改进后的 PMV-PPD 计算模型相对于传统 PMV-PPD 计算模型更具有一定的普适性.

2）当新陈代谢率和服装热阻一定时,PMV 对空气温度的灵敏度随着空气温度的升高先降低后增大.当新陈代谢率为 58.15,服装热阻为 0.35、0.5、0.7 时,随着温度的变化,PMV 对空气温度的灵敏度最低点皆为 0,最高点依次为 0.278、0.243、0.204,当服装热阻为 0.35,PPD 对空气温度的灵敏度最低点皆为 0,最高点依次为 0.132、0.121、0.107.

3）当新陈代谢率为 58.15 时,随着空气温度的升高,系统失效概率逐渐降低,当新陈代谢率为 116.3 及 139.56 时,随着空气温度的升高,系统的失效概率逐渐增大.当新陈代谢率为 58.15,服装热阻分别为 0.35、0.5 及 0.7 时,随着空气温度的变化,失效概率最高点分别为 1、0.933、0.410,最低点分别为 0.309、0.167、0.038.

参考文献(References):

[1] SUI X M, CHEN S Y, HAN B, et al. Evaluation of the thermal environment of Xi'an subway stations in summer and determination of the indoor air design temperature for air-conditioning[J]. Sustainability, 2023, 15(7): 6111.

[2] LI G Q, MENG X, ZHANG X W, et al. An innovative ventilation system using piston wind for the thermal environment in Shanghai subway station[J]. Journal of Building Engineering, 2020, 32: 101276.

[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] LI J X, LI A G, HOU Y C, et al. Air distribution and thermal environment optimization on subway platform using an innovative attached ventilation mode[J]. Building and Environment, 2021, 204: 108226.

[5] 王丽慧, 孙彬, 左沪, 等. 地铁车站轨行区热环境实测研究与分析[J]. 暖通空调, 2023, 53(8): 105－110.
WANG Lihui, SUN Bin, ZUO Hu, et al. Experimental research and analysis of thermal environment in track area of subway station[J]. HVAC Engineering, 2023, 53(8): 105－110. (in Chinese)

[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]. HVAC Engineering, 2016, 46(2): 101－104. (in Chinese)

[7] 张翠林, 张金萍, 蒋佳昀. 城市地铁环境空气污染及热舒适调查[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(01): 318－325.
ZHANG Cuilin, ZHANG Jinping, JIANG Jiayun. Investigation on air pollution and thermal comfort in urban subway environment[J]. Science and Technology and Engineering, 2021, 21(1): 318－325. (in Chinese)

[8] LIU Z Y, LONG Y, YANG T Z, et al. Research on air supply volume and temperature control of subway trains based on passenger capacity[J]. Atmosphere, 2023, 14(2): 258.

[9] 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.

[10] 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]. Xi'an: Chang'an University, 2018. (in Chinese)

[11] 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. (in Chinese)

[12] 高月芬, 韩帅, 刘兆. 地铁屏蔽门系统站台空气品质数值模拟分析[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(增1): 383－388.
GAO Yuefen, HAN Shuai, LIU Zhao. Numerical simulation analysis on platform air quality of subway screen door system[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(S1): 383－388. (in Chinese)

[13] 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 Suihuai, 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. (in Chinese)

[14] 吴立荣, 王乙帆, 李佳敏, 等. 煤矿综采工作面多因素耦合作用下人员热舒适影响规律研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2025, 44(1): 28－40.
WU Lirong, WANG Yifan, LI Jiamin, et al. Study on the influence law of thermal comfort of personnel under multi-factor coupling action of fully mechanized mining face in coal mine[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2025, 44(1): 28－40. (in Chinese)

[15] 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 stations based on machine learning[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2022. (in Chinese)

[16] 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.