

高温天不同室外气温下 地铁车站推荐运行空气温度的理论研究

王丽慧^{1*}, 黄淑敏¹, 高仁义¹, 左沪¹, 刘玉浩¹, 宋洁², 郑懿², 邹学成²

(1. 上海理工大学环境与建筑学院, 上海 200000; 2. 上海申通地铁集团有限公司, 上海 200000)

摘要: 地铁车站的公共区域(站台层、站厅层)在乘客进站的过程中属于过渡区域, 人在此过渡区域的舒适性感受与室内外温差密切相关。本文基于人体热舒适性需求, 令乘客在进站过程中停下时的最大 RWI 值小于或等于其在室外时的 RWI 值, 求得不同室外温度下推荐的站厅运行空气温度, 站台运行空气温度的求取也采用此方法。分析得到推荐的站厅运行空气温度与室外温度呈一定的线性关系, 当室外温度处于 33℃~37℃时, 推荐站厅运行空气温度为 30.1℃~34.4℃; 推荐的站台运行空气温度与站厅温度也呈一定的线性关系, 当站厅温度在 30℃~34℃时, 推荐站台运行空气温度为 28.7℃~32.5℃。最后对推荐运行空气温度下的车站空调系统节能量进行计算, 结果显示, 在整个空调季节使用推荐的运行空气温度相比于常规设计温度的节能量为 149.35×103kWh。

关键词: RWI; 相对热舒适; 地铁车站; 节能量; 推荐运行空气温度

中图分类号: X1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006—7973 (2022) 03—0146—03

在夏季室外高温天, 室外温度较高的时段乘客进地铁站乘车过程中, 满足乘客热舒适性的前提下, 适当地提升车站公共区运行温度具有显著的节能效果。针对地铁这一特殊热环境, 首先美国运输部提出了相对热指标 RWI 和热损失率 HDR 这两个指标来评价地铁环境的热舒适性^[1], 其中 RWI 指标适用于较热的环境, 而 HDR 指标则适用于较冷的环境。朱培根^[2]等人采用现场测试、问卷调查及动态热舒适评价模型, 对公共区域不同季节、不同评价单元的热舒适情况进行了分析和研究, 得出了在夏季时 72% 的乘客对车站内的热舒适度表示满意, 过渡季节 60% 的乘客对车站内的热舒适度表示满意的结果。针对乘客的舒适性要求以及地铁环控系统运营设计方面, 刘雪峰^[3]等人提出了按相对热指标调节运行地铁中央空调系统的理论模型, 即当新风温度从 15℃~37℃、相对湿度从 45%~65% 变化时, 站厅站台相对湿度都能保持在设计范围内。

在夏季高温天时, 适当提高地铁车站运行空气温度不会对乘客的舒适性造成一定影响, 而提高此温度却能显著降低车站空调环控设备的运行能耗, 具有显著的节能效果。既有的地铁设计规范中给出的地铁站厅、站台的空调设计参数广泛地应用于各城市的地铁空调设计, 本文在此参数的基础上, 在保障乘客热舒适性需求的前提下, 提高空调运行温度以达到地铁环控空调系统节能的目的。本文基于过渡区域乘客热舒适性需求, 利用相对热指标 RWI 建立相等的联系, 计算获得不同室外温

度下随室外温度变化的车站站厅、站台运行空气温度, 继而结合热平衡及空调系统空气换热能效比, 对推荐运行空气温度下的车站环控空调系统进行相关节能量计算。

1 理论分析基础

1.1 相对热指标 RWI 及计算公式确定

相对热指标 RWI (Relative Warmth Index) 是美国运输部提出的考虑人体在过渡空间环境的热舒适指标, 其定义式如下。

当空气中水蒸气分压力 $\leq 2269\text{Pa}$ 时, RWI 计算式为:

$$RWI = \frac{M(I_{cw} + I_a) + 6.42(t - 35) + R I_a}{234} \quad (1)$$

当空气中水蒸气分压力 $\geq 2269\text{Pa}$ 时, RWI 计算式为:

$$RWI = \frac{M(I_{cw} + I_a) + 6.42(t - 35) + R I_a}{\frac{65.2 \times (585.844 - P)}{1000}} \quad (2)$$

式中: t 为空气干球温度, $^{\circ}\text{C}$; P 为水蒸气分压力, Pa ; I_a 为新陈代谢率, W/m^2 ; I_{cw} 为服装外空气边界层热阻, clo ; 为湿润时衣服的服装热阻, clo ; R 为单位皮肤面积的平均辐射得热, W/m^2 。

本文按照乘客以一定速度 (1.2m/s) 匀速进站时的状态选取相关 RWI 环控参数, 将上海市夏季地铁空调设计参数作为参考依据, 选取公式 (2) 作为本文的计算公式。

1.2 满足人体热舒适乘客进站过程 RWI 变化规律

基于公式(2)及相关参数计算得到乘客在进站过程中位于不同位置时的相对热指标 RWI 值,图1为计算结果。

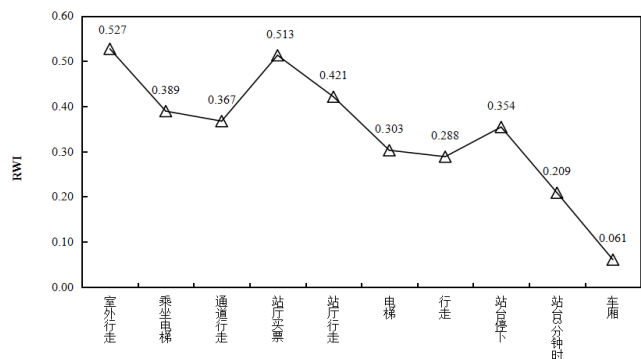


图1 乘客进站过程 RWI 变化曲线

由图1可知,乘客在进站过程中, RWI 最小值为 0.209,参照 RWI 指标值与 ASHRAE 热感觉标度对照表可知,其值高于代表“舒适”的 0.08。然而,基于现有地铁站的相关研究,现有的地铁设计温度可以满足绝大多数乘客的热舒适性需求,这是由于 RWI 总体处于下降的趋势,仅在乘客在站台或站厅突然停下时,空气边界层热阻显著升高,且其新陈代谢率仍保持在行走的状态才出现 RWI 的激增,由于 RWI 的下降,即使计算的 RWI 值要高于 0.08,但乘客在进站过程仍处于舒适的状态。

1.3 计算推荐运行空气温度理论基础

在实际的地铁车站温度设计时,为了保障乘客的热舒适性需求,需满足乘客在进站的过程中 RWI 值总体保持下降的趋势。通过查阅 ASHRAE Handbook^[1]美国地铁设计手册,对于车站站厅层运行温度设计有如下方法,其给出如下两个条件:

①乘客在站厅时 RWI 最大值出现在其突然停下时

②乘客从室外空间进入站厅层,站厅 RWI 最大值等于或小于室外 RWI 值,即:

$$\left(\frac{M(I_{cw}+I_a)+6.42(t-35)+R_{Ia}}{234} \right)_{\text{室外}} \geq \left(\frac{M(I_{cw}+I_a)+6.42(t-35)+R_{Ia}}{234} \right)_{\text{站厅}} \quad (3)$$

因此,本文据图1结论分析及 ASHRAE 手册中提出的方法,在满足乘客热舒适的前提下,使得站厅的温度大于站台的温度,小于室外的温度,乘客进站的过程中 RWI 就能够保持下降的趋势;其次,站厅 RWI 最大值能够小于或者等于室外的 RWI 值,就能保证乘客进站过程 RWI 下降的要求,达到舒适的目的。

2 结果与分析

2.1 不同室外温度下推荐站厅运行空气温度计算

结合 1.3 节的理论基础,本文假设乘客在站厅突然

停下时的 RWI 值等于其在室外行走时的 RWI 值,计算得到的站厅运行空气温度可作为当前室外温度下站厅运行温度的最大值,室外温度与推荐站厅运行空气温度的差值即为能满足乘客舒适性需求的最小温差。

不同的室外温度下,保证 $RWI_{\text{室外行走}} = RWI_{\text{站厅停下}}$ 的站厅运行温度及温差如图2所示,由图可知,推荐的站厅运行温度与室外温度呈一定的线性关系,当室外温度升高时,推荐的站厅运行温度随之升高。当室外温度为 33℃ 时,对应的站厅运行温度为 30.1℃;当室外温度达到 37℃ 时,对应的站厅运行温度为 34.4℃。

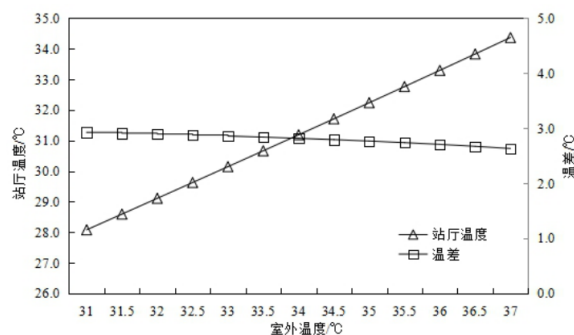


图2 不同室外温度下对应的站厅运行温度及其温差

2.2 不同站厅温度下推荐站台运行空气温度计算

同理,假设乘客在站台突然停下时的 RWI 值等于其在站厅行走时的 RWI 值时,对应的站台运行温度以及站台与站厅温度差亦可求得。

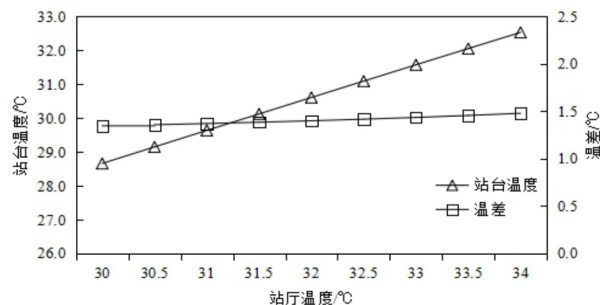


图3 不同站厅温度下对应的站台运行空气温度及其温差

图3为不同站厅温度下对应的站台运行温度及温差,由图可知,推荐站台空气运行温度与站厅温度呈一定的线性关系,当站厅温度升高时,站台运行温度随之升高。当站厅温度为 30℃ 时,对应的站台运行温度为 28.7℃;当站厅温度达到 34℃ 时,对应的站台运行温度为 32.5℃。

2.3 不同室外温度下乘客进站过程 RWI 求解结果

图4为不同室外温度下按照推荐运行温度计算得到的车站不同位置 RWI 的求解结果,从图中可以看出,整个进站过程 RWI 计算结果保持下降的趋势,仅在买票以及突然停下的时候 RWI 达到该区域的最大值。因

此,对于不同的室外温度而言,此站厅及站台温度的设计能够满足乘客的热舒适需求。

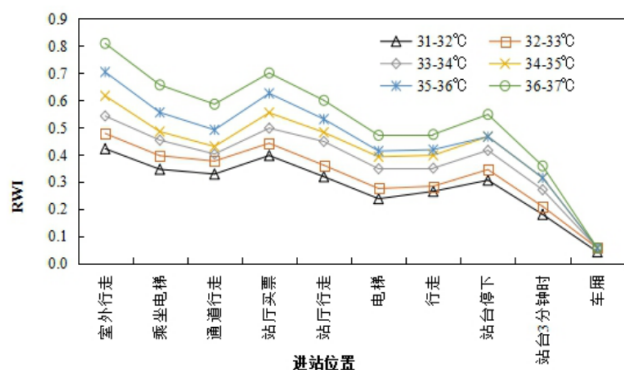


图4 不同室外温度下乘客进站过程RWI的求解结果

2.4 采用推荐运行空气温度下环控设备节能量计算

根据上述室外高温天工况下,站厅层和站台层运行空气温度推荐的理论计算结果,当室外温度高于32摄氏度时,站厅运行温度将高于现有设计温度30℃,站台运行温度将高于现有设计温度28℃,而不影响乘客的热舒适性。根据热量平衡的原理,其节能量计算公式如下:

$$Z_i = (h_i - c_i) v \rho \quad (4)$$

式中: Z_i 为空气能量, kJ; h_i 为推荐运行温度时空气焓值, kJ/kg; c_i 为车站常规设计温度时空气焓值, 站厅取71.6 kJ/kg, 站台取64.9 kJ/kg; v 为车站空气体积, 站厅空气体积为6480 m³, 站台空气体积为4320 m³; 为空气密度, 取1.29 kg/m³。

$$\tau = \frac{v}{G} \quad (5)$$

式中: τ 为时间, s; v 为车站空气体积, m³; G 为送风量, m³/s, 站厅送风量取24 m³/s, 站台送风量取16 m³/s。

$$Q_i = \frac{Z_i}{\tau} \quad (6)$$

式中: Q_i 为冷量, kW; 站内空气湿度取65%; Z_i 为节能量, kJ; τ 为时间, s。

当车站采用推荐的运行温度设计时,不同的室外温度下,使车站温度从推荐运行温度达到常规设计温度时所需冷量不同,考虑到整个空调季节室外温度处于32℃以上各温度段的小时数,小时数可以下式表示:

$$B_1 + B_2 + \dots + B_i = M \quad (7)$$

式中: 为室外温度大于32℃时不同温度段的小时数; 为大于32℃的室外温度总时长。

在地铁环控系统中,空气换热量与车站空调系统各用电设备输入功率计算公式为:

$$\eta = \frac{Q}{\sum N_i} \quad (8)$$

式中: η —空气换热能效比,可取值1.27^[4]; Q —空调箱供冷量, kW; $\sum N_i$ —空调系统各用电设备的平均输入功率之和, kW。

则推荐运行温度相比于常规设计温度的节能量可由下式求出:

$$E = B_1 \sum N_1 + B_2 \sum N_2 + \dots + B_i \sum N_i \quad (9)$$

由式(4)~(9)联立求解可知,整个空调季节推荐运行温度相比于常规设计温度的节能量为149.35 × 103 kWh。

3 结论

在夏季高温天时,在满足乘客热舒适需求的前提下,可适当提升地铁车站公共区运营设计温度来达到节省能耗的目的。本文结论如下:

(1) 乘客在站厅及站台突然停下时RWI会显著升高,其原因为:一方面,乘客在突然停下时其新陈代谢率仍然保持在之前的状态;另一方面,突然停下时因行走产生的相对风速减小,空气边界层热阻显著升高。

(2) 推荐的站厅运行空气温度与室外温度呈一定的线性关系,当室外温度处于33℃~37℃时,推荐站厅运行空气温度为30.1℃~34.4℃。

(3) 推荐的站台运行空气温度与站厅温度也呈一定的线性关系,当站厅温度在30℃~34℃时,推荐站台运行空气温度为28.7℃~32.5℃。

(4) 基于推荐的运行空气温度,地铁环控系統在整个空调季节相比于常规设计温度的节能量为149.35 × 103 kWh。

参考文献:

- [1] Subway Environment Design Hand Book (Volume1) Principles and Applications, 1975.
- [2] 朱培根,王春旺,仝晓娜,宋桦,李晓昀. 地铁站乘客动态热舒适评价研究[J]. 暖通空调, 2016, 46(02): 101-104+40.
- [3] 刘雪峰,刘金平. 基于变风量的相对热指标运行模式在地铁空调中的应用研究[J]. 建筑科学, 2007(04): 78-82.
- [4] 刘畅. 不同运行年限下地铁环控设备系统性能参数演化特性研究[D]. 上海理工大学, 2018.

基金项目: 本论文受国家自然科学基金(51878408)和交通运输部的卫生防疫技术交通运输行业研发中心资助。