

# Design method of rail transit station based on thermal comfort

Boyu Yue

Liaoning Transportation Planning and Design Institute Co., Ltd., Shenyang, Liaoning, 110000, China

## Abstract

As a semi-closed space with high density of people gathering, the environmental control system of rail transit station not only bears the basic temperature and humidity regulation function, but also is directly related to the thermal and comfortable experience of passengers. The traditional ring control design is dominated by system stability and energy saving efficiency, and ignores the coupling relationship between dynamic crowd behavior and thermal perception feedback, which is difficult to meet the dual requirements of modern urban rail transit. Starting from the theory of thermal comfort, this paper system combing the typical characteristics of rail transit station thermal environment, put forward the passenger heat perception as the core of the ring control system design method, focus on the air conditioning supply strategy, ventilation path optimization, heat load control and intelligent feedback mechanism, and combined with energy consumption management and multi-target optimization model, build thermal comfort and operation efficiency of ring control system.

## Keywords

rail transit station; thermal comfort; environment control; system design; intelligent control

# 基于热舒适性的轨道交通车站环控设计方法

岳渤雨

辽宁省交通规划设计院有限责任公司, 中国·辽宁 沈阳 110000

## 摘要

轨道交通车站作为高密度人流聚集的半封闭空间, 其环境控制系统不仅承担着基础的温湿调节功能, 更直接关系到乘客的热舒适体验。传统环控设计多以系统稳定与节能效率为主导, 忽视了动态人群行为与热感知反馈的耦合关系, 难以满足现代城市轨道交通对舒适性与智能化的双重要求。本文从热舒适性理论出发, 系统梳理轨道交通车站热环境的典型特征, 提出以乘客热感知为核心的环控系统方法, 重点探讨空调送风策略、通风路径优化、热负荷调控及智能反馈机制等关键环节, 并结合能耗管理与多目标优化模型, 构建热舒适性与运行效率协同提升的环控体系。

## 关键词

轨道交通车站; 热舒适性; 环境控制; 系统设计; 智能调控

## 1 引言

城市轨道交通作为现代都市出行的重要组成部分, 其运行空间的环境品质对乘客体验产生深远影响。车站作为系统节点, 常处于人员密集、热源集中、通风受限的复杂热环境中。传统环控系统往往以设备能力配置为基础, 侧重稳定运行与能耗控制, 忽略了人在空间中的热感受与生理响应, 从而难以实现对舒适性需求的精细满足。随着公共交通系统服务理念的演进, 乘客体验逐步上升为核心目标, 热舒适性作为直接关联人身感受的重要指标, 已成为轨道交通车站环控设计的重要考量。本文尝试打破以往技术主导的思维框架, 提出以热舒适性为导向的综合性设计方法, 为轨道

车站营造更加宜人的微气候环境提供理论基础与实践思路。

## 2 热舒适性基本理论与评估指标

热舒适性是指人在特定热环境中对冷热状态的满意程度, 是环境物理参数与人体生理反应之间相互作用的结果。空气温度、湿度、风速与辐射强度构成热环境的基础要素, 同时人体的衣着热阻、代谢水平、活动状态与心理预期也显著影响热感知。在理论层面, 热舒适性以人体热平衡原理为基础, 通过热量生成、传导、对流与蒸发过程评估人体是否处于热中性状态。在工程实践中, ASHRAE 55 与 ISO 7730 标准被广泛采用, 通过预测平均评价 (PMV) 与预测不满意率 (PPD) 建立定量评估体系, 界定热舒适区间, 为建筑环境控制提供目标范围。当前研究正从静态均衡模型向动态适应模型转变, 强调个体差异、情境因素及行为反馈的综

【作者简介】岳渤雨 (1992-), 男, 中国辽宁葫芦岛人, 硕士, 工程师, 从轨道交通环控方向研究。

合作用,为精细化、智能化的热舒适调控提供理论支撑<sup>[1]</sup>。

### 3 轨道交通车站热环境特征分析

轨道交通车站作为典型的高密度公共空间,其热环境受空间结构、客流分布与运行设备热源的多重叠加影响,呈现出动态性、区域性与非均质性特征。车站内部通常由站厅、站台、通道及附属用房构成,空间形式封闭复杂,空气流动性差,容易产生热滞留现象。高峰时段大量乘客聚集和持续活动释放人体热量,叠加照明、扶梯、电梯等设备运行所产生的显著热负荷,使局部区域温湿度迅速升高。地铁车站中自然通风能力有限,热量难以通过自然方式有效排散,尤其在夏季易形成持续热积累,影响乘客热感舒适度。环境控制系统在此背景下需承担多区域、多时间尺度的动态调节任务,需兼顾热负荷变化、乘客分布特征与设备运行效率,构建具有高适应性与精细响应能力的热环境调控机制。

## 4 环控系统设计中热舒适性适配机制

### 4.1 空调系统风量与送风方式匹配设计

轨道交通车站空调系统需根据热舒适性要求调整风量与送风形式以实现均匀温度分布和有效冷热覆盖。在大客流区域,人体散热量平均为 120W/人,高峰时段乘客密度可达 3 人/m<sup>2</sup>,单位面积热负荷超过 360W/m<sup>2</sup>,需提高送风量至 40~50 L/s·人以满足热负荷平衡。传统顶部送风方式在高空间区域存在冷热分层现象,温度梯度可达 4℃以上,导致站台底部区域冷热不均,降低热舒适度。送风方式的优化可采用低位侧送结合顶排形式,实现温度场的垂直均衡。风量控制策略应与客流动态联动,基于人数实时调整风机转速与送风量,保障在节能基础上的舒适性响应,同时避免风速过大造成的不适感。

### 4.2 通风换气系统的温湿联动调控

轨道交通车站内通风系统需兼顾热量排散与湿度调节,保持空气品质与热舒适性双重目标。在夏季高温时段,站内相对湿度常超过 75%,超过 ASHRAE 推荐上限 60%,容易引发闷热感并降低冷却效率。有效的温湿联动调控系统应具备自动调节进排风比例与除湿能力的功能,常规换气量设计值为常规换气量设计值为 812 次/h,关键区域可提高至 15 次/h。实际运行中,增加新风比例至 40%可显著改善湿度水平,但将增加冷负荷 12%以上,需引入显热与潜热分离处理机制以提高能效。温湿度传感器密度建议为每 100m<sup>2</sup> 布设 1 组,以实现空间参数的快速采集与控制响应。

### 4.3 地源热泵与冷热储能技术应用潜力

地源热泵系统利用地下恒温特性进行冷热调节,适用于轨道交通车站稳定负荷区间的热舒适控制。在年均气温 15℃、地温保持在 18℃左右的城市中,地源热泵系统可将空调系统能效比提升至 4.5,优于传统风冷系统平均 COP 值

3.2。系统初期投资高于常规系统 20~30%,但在 5 年运行周期内可回收成本并实现能耗降低 25%。冷热储能技术通过低谷电价时段蓄冷蓄热,可有效削减高峰负荷,对动态热环境调节具有明显优势。研究显示,设置 12 小时蓄冷系统可削减日最大负荷 20%,结合地源热泵运行可进一步提升调节灵活性。车站空间有限需采用高能量密度材料如冰蓄冷系统,其单位体积储能可达 60kWh/m<sup>3</sup>,有助于实现局部区域舒适性微调与能源利用效率的双重提升<sup>[2]</sup>。

## 5 热舒适导向下的能耗优化策略

### 5.1 环控系统能效与热舒适性的平衡关系

轨道交通车站环控系统在运行过程中需兼顾热舒适性和能源效率两方面要求。空气温度、风速和湿度等变量对乘客热感知产生直接影响,而系统负荷调整又直接关系整体能耗水平。在标准工况下,当站内温度设定为 24℃,风速为 0.15m/s,相对湿度维持在 60%,PMV 值可控制在 ±0.2,PPD 低于 10%,系统能效比 COP 为 3.6。若温度设定升高至 26℃,COP 可提升至 4.1,节能比例达到 18%,但 PMV 指数升至 0.6,PPD 接近 25%,乘客舒适度明显下降。研究发现,微调温度设定配合风速修正可获得更优权衡,例如维持设定温度在 24.5℃,并将风速适当调高至 0.2m/s,乘客热感受波动幅度减少,而系统能效比仅下降 0.2。在此基础上引入基于热舒适反馈的模糊逻辑控制算法,可实时修正系统参数,实现节能率提升 10%以上,且舒适性指标波动幅度始终控制在标准许可范围内,有效解决系统过度运行或响应滞后的问题,构建以热舒适为核心约束条件的能耗调控体系,推动环控系统向高效、智能的方向演进。

### 5.2 不同时段与客流状态下的分区控制

轨道交通车站全天热负荷受乘客分布、设备运行与外界气象等因素影响显著波动,不同时段客流状态直接决定各区域的热环境变化特征。高峰期站台及站厅区域乘客密度超过 3 人/m<sup>2</sup>,总体热负荷可达 450W/m<sup>2</sup>,而夜间清客后同一空间热负荷不足 60W/m<sup>2</sup>,差值高达 7.5 倍,若采用统一控制模式极易导致过度供冷或热响应不足。实施分区控制策略后,车站可划分为 4 至 6 个独立调控区域,通过布设密集型传感器阵列实时采集温湿参数与人员密度,结合变风量送风系统及区域化温度控制终端,实现动态调节。在典型运营场景下,分区控制可使系统日均能耗降低 13%至 18%,同时将热舒适性 PMV 值波动范围压缩在 ±0.4 以内,有效减少局部过冷或闷热现象。中午换班时段热负荷瞬间波动值可超过 200W/m<sup>2</sup>,通过区域联动控制,可在 30 秒内完成负荷响应,显著提升系统对突发负荷的调节能力。相比传统全区域控制,分区策略在稳定性、舒适性与能效表现方面均显示出优越性,具有良好工程推广价值,图 1 为轨道交通车站热舒适分区控制图。

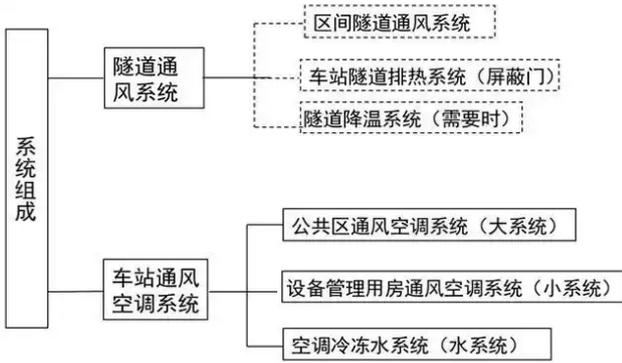


图 1 轨道交通车站热舒适分区控制图

### 5.3 基于热舒适参数的能耗分项管理模式

将轨道交通车站环控系统能耗管理建立在热舒适参数基础上，可实现能源消耗与舒适体验的双重目标协同优化。车站运行中空调系统能耗占总环控负荷的比重约为 52%，通风换气系统为 28%，照明及电扶梯设备合计不超过 20%。采用传统能耗管理方法仅以电表计量为主，无法细化至舒适性维度，调控策略缺乏针对性。引入基于 PMV 和 PPD 指标的热舒适评价模型后，可为各子系统建立响应阈值，例如 PMV 变化  $\pm 0.2$  内允许空调风量波动 20%，而当 PPD 超过 20% 时则强制调整送风温度至优化区间。通过热舒适反馈控制，将空调系统 COP 稳定在 3.5 至 3.8 之间，同时在不同运行模式下智能切换节能策略，实测节能幅度达到 14%。分项能耗控制还需结合预测性调度模型，依据历史客流与气象数据对未来 48 小时热负荷变化进行模拟，提前优化排程。在典型工况下，此类管理模式可使系统整体能效提升 12%，热环境波动幅度降低 30%，表现出较强的运行鲁棒性与动态适应性。热舒适参数与分项能耗耦合控制正逐步成为轨道交通环控系统的核心趋势<sup>[3]</sup>。

### 6 传感网络布局与热环境数据采集

热舒适导向的环境控制系统依赖高密度、高响应的传感网络对车站内部热环境进行实时感知与精细刻画。车站空间结构复杂，垂直高度变化大、功能区域分散，需在站厅、站台、通道、换乘节点等关键位置布设温度、湿度、风速、CO<sub>2</sub> 浓度等多参数传感器，每 100 平方米设置 1 至 2 组传感单元为宜<sup>[4-5]</sup>。为避免环境数据延迟失真，采样频率宜设

为 10 秒一次，并采用无线通讯方式与中央控制系统联动。传感器数据可结合位置坐标生成二维热环境分布图，实现对局部微气候的动态监测。数据接入云端平台后可进行趋势分析与突变识别，支持系统实时判断热负荷变化与乘客感知差异。高精度、低延迟的传感体系为后续评估模型、调控算法及能耗优化提供了坚实的数据基础，使热舒适控制具备更强的实时性与空间识别能力。引入乘客热感投票机制，采集主观热舒适反馈，通过数据拟合修正模型偏差值，使评估结果更加贴合实际体验。评估模型可实现误差范围控制在  $\pm 0.15$  的 PMV 单位内，适应站内复杂动态环境。热舒适模型的持续更新机制不仅提升评估精准度，也为智能控制策略提供实时输入，提高整体系统响应效率与环境适配能力。

### 7 结语

轨道交通车站作为高密度运行的复杂空间，其环境控制设计需突破传统节能导向模式，转向以热舒适性为核心的系统性优化路径。围绕热环境特征、调控机制、能耗策略与智能反馈展开的多层级设计，将感知技术、评估模型与控制算法有机融合，构建了更具响应性与适应性的环控系统。在实际运行中，热舒适参数已逐步成为评价控制效果与能源效率的关键指标，推动环控系统从静态配置向动态感知、智能决策转型。通过对热舒适性本质特征的精准把握与系统设计逻辑的深入重构，可显著提升乘客体验质量与空间环境表现，为未来城市轨道交通设施实现高品质运营提供理论支撑与技术参考。

### 参考文献

- [1] 王鑫,刘凯凯,李森生,陈玉远,林泽日.地铁地下车站公共区温湿度环境限值与分级研究[J].工业安全与环保,2024,50(11):83-87.
- [2] 吴业飞,周青松,崔鑫,吴王剑.市域轨道交通“桥建合一”高架车站车致振动响应分析[J].城市道桥与防洪,2024,(06):240-244+253+28-29.
- [3] 李政普.地铁车站通风空调系统运行策略优化方法研究[D].导师:赵蕾.西安建筑科技大学,2024.
- [4] 许翔翔.铁路枢纽车站短时客流预测及流线组织优化策略研究[D].导师:周浪雅.中国铁道科学研究院,2024.
- [5] 孙宁.交通执勤人员秋冬季室外微生物气溶胶暴露和热舒适性评价[D].导师:张金萍,陈晓春.北京建筑大学,2024.