

doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2026.02.016

基于仿自然风技术的地铁车站 热环境优化研究

韦庭三¹, 顾浪腾¹, 李正杰¹, 张壮飞², 杨家亮², 石卫师¹

(1. 南宁轨道交通运营有限公司, 南宁 530029; 2. 厦门锐创节能科技有限公司, 福建厦门 361001)

摘要: 针对地铁车站传统空调系统能耗高、热环境调控滞后等问题, 提出一种融合空间网格化监测、计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)预模拟与设备联动控制等仿自然风技术的动态热环境管理系统。在南宁轨道交通1号线南湖站改造工程中, 部署45处传感器构建网格化监测网络, 基于CFD预模拟优化布局监测点与风扇位置; 研究以体感温度为核心的分级控制策略, 实现空调与仿自然风风扇的智能联动, 达到空调系统节能的效果。结果表明: 在环境温度提升至29℃时, 系统通过增强湍流散热(风速0.8~2.5 m/s)使体感温度等效于27℃, 预测平均热感觉指数(predicted mean vote, PMV)值降至0.8~1.2(预测不满意百分数(predicted percentage dissatisfied, PPD)≤19%), 空调季综合节能率达32.1%。该系统为地铁站绿色改造提供可复用的技术路径。

关键词: 地铁车站; 动态热环境管理; 网格化监测网络; CFD模拟; 节能

中图分类号: U231

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2026)02-0129-06

Thermal Environment Optimization of Metro Stations Based on Nature-Like Wind Technology

WEI Tingsan¹, GU Langteng¹, LI Zhengjie¹, ZHANG Zhuangfei², YANG Jialiang², SHI Weishi¹

(1. Nanning Rail Transit Operation Co., Ltd., Nanning 530029;

2. Xiamen Ruichuang Energy-Saving Technology Co., Ltd., Xiamen, Fujian 361001)

Abstract: To address the problems of high energy consumption and lagging thermal environment regulation in traditional air-conditioning systems of metro stations, this study proposes a dynamic thermal environment management system integrating nature-like wind technology with spatially gridded monitoring, CFD pre-simulation, and equipment-linked control.

In the reconstruction project of Nanhu Station of Nanning Rail Transit Line 1, 45 sensors were deployed to construct a gridded monitoring network, and the layout of monitoring points and fan positions was optimized based on CFD pre-simulation. A hierarchical control strategy centered on perceived temperature was developed to realize the intelligent linkage between air conditioners and nature-like wind fans, so as to achieve the energy-saving effect of the air conditioning system. The results show that when the ambient temperature rises to 29℃, the system enhances turbulent heat dissipation (wind speed 0.8–2.5 m/s), making the perceived temperature equivalent to 27℃; the PMV value drops to 0.8–1.2 (PPD≤19%), and the comprehensive energy-saving rate in the air conditioning season reaches 32.1%. The system provides a replicable technical pathway for the green renovation of metro stations.

Keywords: metro station; dynamic thermal environment management; gridded monitoring network; CFD simulation; energy conservation

收稿日期: 2025-04-27 修回日期: 2026-01-06

第一作者: 韦庭三, 男, 学士, 高级工程师, 主要从事轨道交通运维及节能技术研究, weitingsan@nngdjt.com

通信作者: 石卫师, 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事轨道交通运维及节能技术研究, shiweishi@nngdjt.com

基金项目: 广西2025年“八桂之光”访学研修计划(科技人才专项)

引用格式: 韦庭三, 顾浪腾, 李正杰, 等. 基于仿自然风技术的地铁车站热环境优化研究[J]. 都市轨道交通, 2026, 39(2): 129–134.

Wei Tingsan, Gu Langteng, Li Zhengjie, et al. Thermal environment optimization of metro stations based on nature-like wind technology[J]. Urban rapid rail transit, 2026, 39(2): 129–134.

地铁车站作为城市交通的重要枢纽,具有人员流动密集、空间相对封闭、设备散热集中等特点。其热环境质量直接影响乘客的出行体验和健康。传统的地铁车站热环境管理主要依赖固定设定值的中央空调系统(采用固定温度阈值控制),存在能耗高、对动态变化的热负荷响应不足、无法精准满足不同区域热舒适需求等问题。随着“双碳”目标的推进,如何在保障乘客舒适度的前提下,实现地铁车站热环境的高效节能管理成为亟待解决的关键问题^[1-2]。

在民用建筑领域,已有研究针对办公楼、大型商场等封闭空间开展热环境优化。Li等基于实地测量,为传感器网络的代表性布点、采样频率和监测周期提供实证指导^[3]。王军等通过CFD模拟优化商场通风系统布局,使空调能耗降低22%^[4]。针对夏热冬暖地区的特殊气候条件,相关学者开展了通风辅助空调节能策略探讨,证实了自然通风与机械通风结合可有效降低空调系统负荷^[4],为高湿高热地区公共建筑节能提供了新思路。另有研究开展了落地扇与空调联合运行舒适性与节能试验,发现合理的风扇风速可在提升环境温度设定值的同时保障热舒适,为多设备联动调控提供了试验支撑^[5]。但此类研究多聚焦于静态热负荷场景,针对地铁车站高人流、动态热负荷的适配性研究仍较为缺乏。近年研究表明,提升风速可显著改善热环境舒适度^[6],但现有方法未解决监测盲区与动态响应问题,本研究通过网格化传感网络与CFD预模拟的结合弥补此缺陷。

1 地铁站动态热环境管理系统架构设计

1.1 系统总体框架

地铁站动态热环境管理系统旨在通过对站内热环境的实时监测、精准模拟和智能控制,实现对温度、湿度、风速等参数的动态调节,以满足乘客舒适度需求并降低系统能耗。系统主要由环境采集子系统、数据处理子系统、设备控制子系统和人机交互子系统组成,各子系统之间通过以太网(Modbus_TCP协议)和RS485总线(Modbus_RTU协议)进行数据传输和指令交互,形成1个闭环的智能管理系统,系统结构如图1所示。

1.2 环境采集子系统

环境采集子系统是动态热环境管理系统的基础,其主要功能是实时采集地铁站内各区域的温度、湿度、风速、二氧化碳浓度、PM_{2.5}等环境参数。为实现对

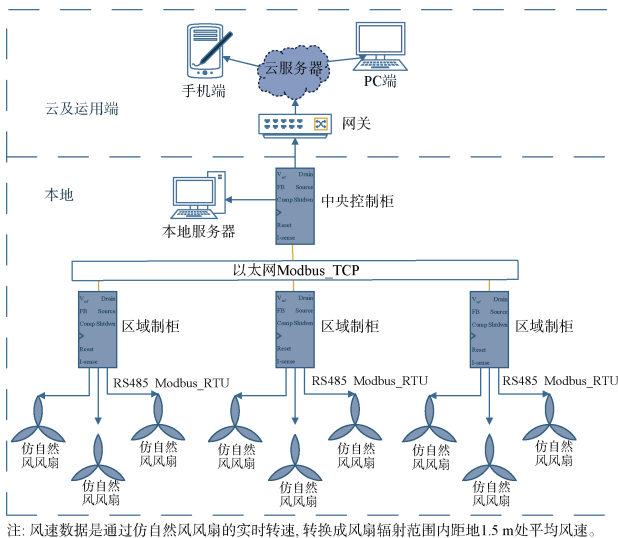


图1 系统结构

Figure 1 System architecture

站内热环境的精细化监测,采用空间网格化划分方法,将地铁站站厅、站台等公共区域划分为若干个单元空间网格,每个网格内布置温湿度传感器、风速传感器等监测设备。例如,在南宁轨道交通1号线南湖站的改造中,使用环境数据传感器45个,其中二合一(温度、湿度)传感器43个,七合一(温度、湿度、二氧化碳、PM_{2.5}、PM₁₀、TVOC、噪声)传感器2个;风速传感器45个(通过仿自然风风扇的实时转速转换成风扇辐射范围内距地1.5 m处平均风速)。每个仿自然风风扇安装支架上安装1个传感器,选择站厅区和站台区中心部位的仿自然风风扇位置安装七合一传感器,其余均安装温湿度传感器^[6]。

1.3 数据处理子系统

数据处理子系统负责对环境采集子系统获取的实时数据进行存储、分析和处理。首先,将传感器采集的原始数据进行滤波、校准等预处理,去除噪声和异常值,确保数据的准确性和可靠性。

1.4 设备控制子系统

设备控制子系统是动态热环境管理系统的核心,其主要功能是根据数据处理子系统的分析结果,对空调、仿自然风风扇等设备进行联动控制,实现对站内热环境的动态调节。控制策略采用分级控制方式,根据监测点平均温度($T_{测}$)触发不同的运行模式,以实现动态热环境调节与节能运行。

1.5 人机交互子系统

人机交互子系统为管理人员提供一个直观、便捷的操作界面,实现对系统的实时监控、参数设置和设

备管理。通过本地服务器建立数据库,对中央控制柜数据进行存储管理,通过 web 式的页面,将实时和历史数据形成报表,展示站内各区域的环境参数、设备运行状态和能耗数据等信息。管理人员可以通过人机交互界面实时查看站内热环境状况,远程调节设备运行参数,实现对系统的智能化管理。同时,系统还具备数据输出功能,可开放接口和通信协议,接入站内综合监控系统,实现数据的二次开发和共享。

2 关键技术研究

2.1 空间网格化温度监测技术

空间网格化温度监测技术是实现地铁站热环境精细化管理的基础。通过人为测量获取监测区域的范围,将其划分为若干个单元空间网格区域,每个网格区域的大小根据地铁站的空间结构和人员分布情况确定。在每个单元空间网格区域内配置至少 1 个温湿度采集单元,如温度传感器,用于实时获取该区域内的温湿度变化。

温湿度采集单元按照人为设定的第 1 期间对温湿度值进行采集、存储与比较,获取在第 1 期间的温湿度差值。用温湿度差值及空气比热容、空气密度、单元空间网格区域体积等参数计算出各单元空间网格区域所吸收或散失的热量,进而通过各单元空间网格区域所吸收或散失的热量之和计算设备的发热或制冷量。该技术能够精准地获取各区域的温度变化情况,为后续的热环境模拟和设备控制提供准确的数据支持。

2.2 CFD 数值模拟技术

利用 CFD 数值模拟在系统部署前完成^[7]确定温度/风速监测点位置和优化风扇安装角度。模拟基于 Airpak 软件,边界条件参照南宁夏季设计日参数(室外温度 34.2℃,相对湿度 75%)。系统运行时仅依赖实时传感器数据进行动态调控,CFD 不参与在线计算。

CFD 数值模拟技术在地铁站动态热环境管理系统中主要用于确定实际空间内温度、相对湿度及风速监测点位置,以及优化设备布局 and 通风方案。利用 CFD 软件,根据边界条件(外围护结构热工性能参数、室外环境参数)、初始条件(热源发热量、室内初始温湿度、循环风扇初始风速和风量、空调制冷量)及不同布局的空间模型(房间空间尺寸、布局、外围护结构类型及材质)进行数值求解,得到多组对应不同布局空间模型的温度场、相对湿度场及风速矢量场^[7]。

对多组模拟结果进行归纳分析,确定能够准确反

映主要目标对象真实体感温度的监测点位置。在设备布局优化方面,通过模拟不同设备布置方案下的热环境参数分布,找出最优的设备安装位置和运行参数,以提高热交换效率和乘客舒适度。例如,在南宁轨道交通 1 号线南湖站的改造中,通过 CFD 模拟确定了仿自然风风扇的最佳安装位置和角度,确保风扇产生的气流能够均匀分布在站厅和站台区域,提高人体散热效果^[2]。

2.3 体感温度与 PMV/PPD 计算模型

2.3.1 体感温度(SET*)模型

体感温度是衡量人体热舒适的重要指标,其计算模型综合考虑了温度、湿度、风速等多因素对人体热感觉的影响。本研究采用的模型基于 Fanger 热舒适理论,并结合 ASHRAE Standard 55-2020^[8]对人体热舒适区间的定义,能够准确反映不同环境参数下的人体热反应,为设备联动控制策略提供科学依据,确保乘客在地铁站内的热舒适需求。

$$T_{SET^*} = Ta + 0.33e - 0.70V - 4.00 \quad (1)$$

式中, T_{SET^*} 为标准有效温度; Ta 为空气干球温度,℃; e 为水汽压, kPa; V 为风速, m/s。

该模型经 Fiala 人体热生理实验验证^[9],误差±0.5℃。相较传统公式,更适应地铁站高湿环境^[10]。

饱和水汽压 e_s (Tetens 公式,适用于 0~50℃,单位 kPa):

$$e_s = 0.061094 \exp \frac{17.625Ta}{243.04 + Ta} \quad (2)$$

则:

$$T_{SET^*} = Ta + \frac{2.016RH}{10000} \exp \frac{17.625Ta}{243.04 + Ta} - 0.70V - 4.00 \quad (3)$$

式中, RH 为相对湿度(%)。

2.3.2 PMV 与 PPD 计算依据

采用 Fanger 热舒适理论计算 PMV(预测平均热感觉指数)与 PPD(预测不满意百分数),适配地铁站乘客静态活动场景(代谢率 $M=1.0$ met,服装热阻 $I_{cl}=0.5$ clo):

1) PMV 模型。综合考虑人体代谢、服装热阻及环境参数,PMV 公式如式(4):

$$PMV = [0.303 \exp(-0.036M) + 0.028] \times (M - W) - 3.05 \times 10^{-3} \times [5733 - 6.99(M - W) - Pa] - 0.42 \times [(M - W) - 58.15] - 1.7 \times 10^{-5} \times M \times (5867 - Pa) - 0.0014 \times M \times (34 - Ta) - 0.0173 \times M \times (5.87 - 0.007Ta) - 0.0015 \times M \times Ta \quad (4)$$

式中, W 为 0(静态活动,无做功); Pa 为 e (水汽压, kPa)。

2) PPD 模型。基于 PMV 计算不满意乘客百分比,PPD 计算如式(5):

$$\text{PPD}=100-95\times\exp[-0.033\ 53\times\text{PMV}^4-0.217\ 9\times\text{PMV}^2] \quad (5)$$

数据核算：以改造后实测数据($T_a=29^\circ\text{C}$, $\text{RH}=60\%$, $V=1.8\text{ m/s}$)为例, 计算得 $\text{PMV}\approx 0.8$, 再代入式(5)得 $\text{PPD}\approx 18.6\%$, 与“ $\text{PMV}=0.8\sim 1.2(\text{PPD}\leq 19\%)$ ”的结果一致, 数据准确。

2.4 设备联动控制策略

设备联动控制策略是实现地铁站热环境动态调节和节能运行的关键。根据监测点平均温度和体感温度计算值, 制定不同的设备运行模式。

- 1) 当 $T_{\text{测}}\leq 25^\circ\text{C}$ 空调和仿自然风风扇均不开启。
- 2) 当 $25^\circ\text{C}<T_{\text{测}}<28^\circ\text{C}$ 时, 空调不开启, 仿自然风风扇低速运转, 保持自然通风状态, 传感器持续监测 15 min, 实时掌握环境温度变化情况。
- 3) 当 $28^\circ\text{C}\leq T_{\text{测}}<30^\circ\text{C}$ 时, 空调不开启, 开启仿自然风风扇。首先, 用设定体感温度、实测温度及实测相对湿度代入体感温度算法模型(式(3)), 计算出所需的风速大小, 依据风速计算值调节仿自然风风扇转速, 保持空调不开启、仿自然风风扇开启、传感器持续监测 2 min。然后, 依据实际空间内温度、相对湿度及风速监测点传感器实时数据, 通过体感温度算法模型计算出实时体感温度。当体感温度计算值 T_{SET}^* 等于小于设定值时, 仿自然风风扇继续以此转速保持动作 30 min, 以维持良好的热舒适状态。
- 4) 当 $T_{\text{测}}\geq 30^\circ\text{C}$ 时, 空间中的空调开启, 仿自然风风扇以最高转速开启, 空调区设定为 29°C , 保持空调动作及仿自然风风扇动作 15 min。接着, 当体感温度计算值 T_{SET}^* 等于小于设定值时, 空调及仿自然风风扇继续保持动作 30 min; 当 T_{SET}^* 计算值大于设定值时, 发出警报, 提示管理人员进行人工干预, 运维人员需在 10 min 内完成参数调整, 系统自动比对于干预前后 15 min 环境数据, 若 $\text{PPD}>20\%$ 则启动备用空调机组。

3 应用案例分析——以南宁轨道交通 1 号线南湖站为例

3.1 项目简介

南宁轨道交通 1 号线南湖站是典型的地下地铁站, 客流量大, 加之设备散热(如照明、自动扶梯、信号设备)导致站内热负荷集中, 传统空调系统能耗较高。为响应国家“双碳”目标, 开展健康舒适环境系统试点改造项目, 核心目标是通过加装仿自然风风扇和优化空调控制策略, 将站厅区和站台区的环境温度提高至

29°C , 同时保障人体舒适度, 减少空调负荷。

3.2 改造内容

3.2.1 设备配置与布局

依据室内环境多物理场耦合计算及舒适度评价, 在站厅区和站台区加装 45 台永磁仿自然风风扇(42 台直径 3 m、3 台直径 2 m), 单台风扇额定功率分别为 0.35 kW (3 m 型)和 0.25 kW (2 m 型), 满载风量分别为 $1500\text{ m}^3/\text{min}$ 和 $640\text{ m}^3/\text{min}$, 覆盖面积 120 m^2 和 52 m^2 。每台风扇配置独立控制器^[11], 支持 $0\sim 3\text{ m/s}$ 风速调节; 每 8~10 台风扇划分为 1 个管控区域, 设置区域控制柜(共 5 台), 集成温湿度传感器(43 个)和七合一传感器(2 个), 实时采集环境数据并上传至中央控制柜^[6], 如图 2 所示。



图 2 永磁仿自然风风扇布置图
Figure 2 Layout of Permanent Magnet Imitation Natural Wind Fan

3.2.2 控制策略优化

调整环境与设备监控系统(building automation system, BAS)后台控制逻辑, 设定空调系统目标温度为 29°C (原系统为 27°C), 湿度控制区间 $40\%\sim 70\%$ 。具体策略如下。

- 1) $T_{\text{测}}\leq 25^\circ\text{C}$ 时, 空调和仿自然风风扇均不开启。
- 2) $25^\circ\text{C}<T_{\text{测}}<28^\circ\text{C}$ 时, 关闭空调, 启动低速风扇(转速 $\leq 40\text{ rpm}$), 维持空气流通, 降低设备待机能耗。
- 3) $28^\circ\text{C}\leq T_{\text{测}}<30^\circ\text{C}$ 时, 空调待机, 风扇根据体感温度算法自动调节转速($40\sim 70\text{ rpm}$), 目标风速 $1.2\sim 2.5\text{ m/s}$, 通过增强人体对流散热补偿环境温度升高的影响。
- 4) $T_{\text{测}}\geq 30^\circ\text{C}$ 时, 空调与风扇联动运行, 风扇以最高转速(90 rpm)运行, 配合空调将体感温度控制在 26°C 以下, 同时通过变频技术调节空调冷水机组输出功率, 避免过度制冷。

3.3 数据采集与分析

3.3.1 环境监测数据

改造后连续监测数据显示, 站厅区和站台区平均

温度稳定在 $28.5\sim 29.3^{\circ}\text{C}$, 相对湿度 $55\%\sim 68\%$, 二氧化碳浓度 $\leq 800\text{ ppm}$, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度 $\leq 35\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$, 符合 GB50157—2013《地铁设计规范》^[12] 要求。在早高峰(7:30~9:00)和晚高峰(17:30~19:00)时段, 通过风扇与空调联动, 体感温度可控制在 $25^{\circ}\text{C}\sim 27^{\circ}\text{C}$, 乘客热舒适投票(PMV)均值为 $0.8\sim 1.2$, 预测不满意百分比 $\text{PPD}\leq 19\%$, 显著优于改造前 $\text{PMV}=1.5\sim 1.8$, $\text{PPD}=25\%\sim 30\%$ 的水平。

3.3.2 热环境模拟验证

利用 Airpak 对改造后站厅区(标高 1.2 m)进行 CFD 模拟, 结果如下。

1) 风速分布。风扇产生的湍流风速在 $0.8\sim 2.5\text{ m/s}$ 之间, 形成均匀的空气流动场, 有效促进人体汗液蒸发散热, 如图 3 所示。

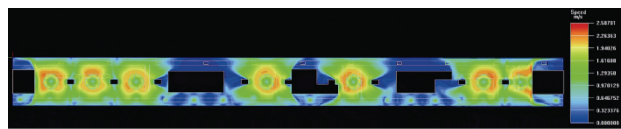


图 3 稳态热环境速度云图

Figure 3 Steady state thermal environment velocity contour

2) 温度场。高温区域($>29^{\circ}\text{C}$)占比从改造前的 35% 降至 12%, 温度梯度($\Delta T\leq 1.5^{\circ}\text{C}$)覆盖面积达 85%, 避免了局部过热现象^[8]。

3) PMV/PPD 云图。90%以上区域 $\text{PMV}\in[-0.5, 1.0]$, 在温度上是较热空间。PPD(不满意度) $<20\%$, 属于舒适区域, 即在空调出风温度在 29°C 时, 即使环境温度上属加热环境, 在湍流环境下传热速度较快, 仍可保障较好的舒适度, 如图 4~5 所示。符合 ASHRAE Standard 55-2020 中“一般室内环境热舒适”要求。



图 4 稳态热环境 PMV 云图

Figure 4 Steady-state PMV contour of the thermal environment



图 5 稳态热环境 PPD 云图

Figure 5 Steady-state PPD contour of the thermal environment

3.3.3 节能效果评估

通过对比改造前后空调季(7、8 月份)的能耗数据,

系统节能效果显著。

1) 空调能耗。改造前, 冷水机组日均耗电 2 935.80 kWh; 改造后, 冷水机组日均耗电 2 144.56 kWh; 日均节电量最高可达 791.24 kWh, 节能率为 26.95%。

2) 风扇能耗。仿自然风风扇日均耗电 92 kWh, 占原冷水机组能耗的 3.13%, 通过减少空调运行能耗, 总能耗下降 23.82%。

3) 综合节能率。考虑空调季起末时段(5 月、10 月)风扇独立运行场景, 全年综合节能率达 32.1%, 超过 GB/T28750—2012《节能量测量和验证技术通则》^[13] 预期目标。

3.4 社会效益与可靠性验证

改造后在热舒适度方面投诉率为 0。消防联动测试显示, 当烟感报警触发时, 所有风扇在 5 s 内停止运行, 即便所有风扇在开启状态通过烟雾测试, 1 min 内消防系统响应, 不影响排烟系统效率, 符合 GB51298—2018《地铁设计防火规范》^[14] 要求。

4 结论与展望

4.1 研究结论

本研究构建的地铁站动态热环境管理系统, 通过空间网格化监测、CFD 预模拟与设备联动控制的有机结合, 实现了热环境的精准监测、动态模拟和智能调控。

1) 技术架构: 构建了“网格化监测-预模拟-体感温度控制”闭环架构, 通过传感器与 CFD 的协同消除监测盲区, 提升了系统对动态热负荷的响应能力。

2) 舒适与节能平衡: 验证了“ 29°C 环境温度+ $0.8\sim 2.5\text{ m/s}$ 风速”可等效 27°C 空调环境, 在保障热舒适($\text{PPD}\leq 19\%$)的前提下实现显著的节能效果。

3) 应用效果: 南湖站改造后综合节能率达 32.1%, $\text{PPD}\leq 19\%$, 为地铁站绿色改造提供可复用技术路径, 具有良好经济效益和社会效益^[6]。

4.2 展望

1) 硬件精简: 通过机器学习分析传感器数据冗余度, 减少非关键区域传感器部署(目标减少 20%), 优化风扇布局(基于人流密度动态调整风扇启停);

2) 自动化升级: 开发自适应控制算法, 高温模式下自动调整空调冷水流量、风扇转速, 减少人工干预频次。

3) 功能拓展: 融合数字孪生技术实现热负荷预测控制, 开发湿度补偿算法(适配南宁梅雨季高湿环境),

集成设备健康监测系统实现预防性维护。

参考文献

- [1] 郭娇杰. 地铁站环控系统节能控制研究综述[J]. 制冷, 2023, 42(3): 1-6.
Guo Jiaojie. Review on energy-saving control of railway station environmental control system[J]. Refrigeration, 2023, 42(3): 1-6.
- [2] 王丽慧, 马长江, 黄淑敏, 等. 活塞风效应下地铁站厅公共区域压力分布特性与出入口渗透风量研究[J]. 能源研究与信息, 2025, 41(2): 98-106.
Wang Lihui, Ma Changjiang, Huang Shumin, et al. Study on pressure distribution characteristics in metro station hall public zones and infiltration airflow at entrances and exits under piston wind effects[J]. Energy research and information, 2025, 41(2): 98-106.
- [3] Li Peixian, Zhao Xiangjun, Wang Siyan, et al. Evidence-based strategies for optimizing long-term temperature monitoring in offices[J]. Indoor environments, 2024, 1(4): 100059.
- [4] 谢富豪, 韩杰, 李越铭, 等. 基于自然通风与空调联合调节的混合冷却系统综述[J]. 桂林理工大学学报, 2022, 42(3): 749-756.
Xie Fuhao, Han Jie, Li Yueming, et al. Review of mixed-mode cooling systems based on natural ventilation and air conditioning[J]. Journal of Guilin University of Technology, 2022, 42(3): 749-756.
- [5] 高敏, 毕海权, 王宏林. 落地扇与空调联合运行舒适性与节能性实验研究[J]. 制冷与空调(四川), 2023, 37(3): 434-443.
Gao Min, Bi Haiquan, Wang Honglin. Experimental study on comfort and energy saving of floor fan and air conditioner combined operation[J]. Refrigeration & air conditioning, 2023, 37(3): 434-443.
- [6] 李彤月, 孟月波, 刘光辉, 等. 基于人群密度估计的空调末端及新风量分级调控方法[J]. 重庆大学学报, 2021, 44(1): 57-66.
Li Tongyue, Meng Yuebo, Liu Guanghui, et al. Air conditioning terminal and new air volume classification control based on crowd density estimation[J]. Journal of Chongqing University, 2021, 44(1): 57-66.
- [7] 赵建建, 王敬远, 何峰, 等. 夏热冬暖地区下沉广场对地下综合交通枢纽通风性能的影响[J]. 暖通空调, 2023, 53(9): 81-86.
Zhao Jianjian, Wang Jingyuan, He Feng, et al. Influence of
- Sunken squares on ventilation of underground comprehensive transportation hubs in hot summer and warm winter zone[J]. Heating ventilating & air conditioning, 2023, 53(9): 81-86.
- [8] 美国采暖、制冷与空调工程师学会. 人员占用空间的热环境条件: ANSI/ASHRAE Standard 55-2020[S]. 佐治亚州桃树角市, 美国采暖、制冷与空调工程师学会, 2020. ASHRAE. ANSI/ASHRAE Standard 55-2020, Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy[S]. Peachtree Corners, GA: ASHRAE, 2020.
- [9] 菲亚拉 D, 哈文尼思 G, 布勒德 P, 等. UTCI-Fiala 人体热传递多节点模型[J]. 国际生物气象学, 2012, 56(3): 429-441.
Fiala D, Havenith G, Bröde P, Kampmann B, Jendritzky G. UTCI-Fiala multi-node model of human heat transfer and temperature regulation[J]. International Journal of Biometeorology, 2012, 56 (3): 429-441.
- [10] 林雪, 张宇峰, 张仲军, 等. 高湿环境对夏热冬暖地区人群热湿舒适性影响研究[J]. 建筑节能(中英文), 2022, 50(6): 84-92.
Lin Xue, Zhang Yufeng, Zhang Zhongjun, et al. Influence of high humidity environment on the thermal and humid comfort of people in hot summer and warm winter area[J]. Building energy efficiency, 2022, 50(6): 84-92.
- [11] Li Haolin, Liu Huan, Zhu Hongyu, et al. Research on the coordinated control of large permanent magnet direct drive fan and air conditioner based on finite element method[J]. Energy reports, 2023, 9: 1334-1345.
- [12] 地铁设计规范: GB 50157—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
Code for design of metro: GB 50157—2013[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.
- [13] 节能量测量和验证技术通则: GB/T 28750—2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
General technical rules for measurement and verification of energy savings: GB/T 28750—2012[S]. Beijing: Standards Press of China, 2013.
- [14] 地铁设计防火标准: GB 51298—2018[S]. 北京: 中国计划出版社, 2018.
Standard for fire protection design of metro: GB 51298—2018[S]. Beijing: China Planning Press, 2018.
- [15] Naeem A, Ho C O, Kolderup E, et al. EnergyPlus as a computational engine for commercial building operational digital twins[J]. Energy and buildings, 2025, 329: 115257.

(编辑: 王艳菊)