

舒适优先多模态感知驱动的智能玻璃自适应控制方法

陈颖欣, 杨雅期, 李泽睿

中国计量大学光学与电子科技学院, 浙江 杭州

收稿日期: 2026年9月20日; 录用日期: 2026年10月11日; 发布日期: 2026年10月21日

摘要

在全球变暖与能源紧缺背景下, 建筑空调系统能耗占比持续攀升, 大面积玻璃结构引起的热交换损失进一步加剧了这一问题。本文系统梳理了智能玻璃控制领域的主要技术流派, 指出现有方法在热舒适建模精度与多模态环境自适应能力方面的不足, 进而提出一种面向绿色建筑的舒适优先、多模态感知驱动的智能玻璃自适应控制方法。系统基于低功耗ESP32搭建物联网终端, 集成传感器实时采集室内外环境参数; 依托ASHRAE热舒适数据库, 采用随机森林建立热舒适参考标准, 并利用支持向量机构建从环境状态到控制行为的映射, 形成以舒适度偏差为驱动的闭环控制策略。实验结果表明, 该方法使室内全年热舒适时长增加了50 h, 平均采光系数提高了2.03%, 全年综合能耗减少了423.387 kWh; 与普通玻璃窗相比, 空调冷负荷显著降低, 建筑整体能耗降低约20%。该方法能够动态响应外界环境变化, 避免机电设备过度补偿所造成的能量浪费, 使建筑冷热负荷需求降低, 验证了其在智能玻璃结构中的节能潜力与应用价值。

关键词

自适应控制, 热舒适, 多模态感知, 绿色建筑

Adaptive Control Method of Smart Glass Driven by Multimodal Sensing with Comfort Priority

Yingxin Chen, Yaqi Yang, Zerui Li

College of Optical and Electronic Technology, China Jiliang University, Hangzhou Zhejiang

Received: September 20, 2026; accepted: October 11, 2026; published: October 21, 2026

Abstract

Against the backdrop of global warming and energy shortage, the energy consumption proportion

文章引用: 陈颖欣, 杨雅期, 李泽睿. 舒适优先多模态感知驱动的智能玻璃自适应控制方法[J]. 土木工程, 2026, 15(10): 59-70. DOI: 10.12677/hjce.2026.1510238

of building air-conditioning systems keeps rising, and heat exchange losses induced by large-area glass structures further aggravate this issue. This paper systematically reviews the main technical schools in the field of smart glass control, identifies the deficiencies of existing methods in thermal comfort modeling accuracy and multimodal environmental adaptability, and thereby proposes an adaptive control method of smart glass driven by multimodal sensing with comfort priority for green buildings. The Internet of Things (IoT) terminal is built based on low-power ESP32, with integrated sensors to collect indoor and outdoor environmental parameters in real time. Relying on the ASHRAE thermal comfort database, random forest is adopted to establish the thermal comfort reference standard, and support vector machine is used to construct the mapping from environmental states to control actions, forming a closed-loop control strategy driven by comfort deviation. Experimental results demonstrate that the proposed method increases the annual indoor thermal comfort duration by 50 h, raises the average daylight factor by 2.03%, and cuts the annual total energy consumption by 423.387 kWh. Compared with conventional glass windows, the air-conditioning cooling load is remarkably reduced, and the overall building energy consumption drops by approximately 20%. The proposed method can dynamically respond to external environmental variations and avoid energy waste caused by excessive compensation of electromechanical equipment, thus lowering the building heating and cooling load demands. Its energy-saving potential and application value in smart glass structures are verified.

Keywords

Adaptive Control, Thermal Comfort, Multimodal Sensing, Green Buildings

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

全球变暖引发的能源短缺已成为现代建筑学与工程学必须面对的课题。建筑能耗，特别是空调制冷和供暖，占全球总能耗 30% 以上，并且仍在迅速增长[1]。建筑物约占全球能源消耗的 40% 和温室气体排放的 28%。在现代建筑中，出于美观和采光需求，玻璃窗和幕墙的使用越来越广泛[2]。然而，普通玻璃的隔热性能有限，对近红外辐射透射率高，同时其表面辐射亦较强，导致显著的能量损失[3][4]。为维持室内舒适温度，建筑通常依赖空调等冷暖设备，这不仅增加能源消耗，也加剧了全球变暖和能源紧张问题[5]。因此，绿色建筑及高性能节能玻璃的研究逐渐成为关注热点。

2. 理论研究

2.1. 智能玻璃技术概述

智能玻璃(Smart Window)借助对光热透射率进行动态调控，为降低建筑暖通空调(HVAC)能耗提供了有效路径。基于调控机理不同，智能玻璃能够分为电致变色(Electrochromic, EC)、热致变色(Thermochromic)、光致变色(Photochromic)、悬浮粒子(Suspended Particle Devices, SPD)和聚合物分散液晶(Polymer Dispersed Liquid Crystal, PDLC)等多种类型。其中，电致变色玻璃以及热致变色玻璃是研究最为广泛的两类，已经得以实现显著节能，同时还可以提升室内舒适度，电致变色玻璃在小电压的作用之下，能够可逆地改变可见光以及近红外的透射率，进而减少眩光、太阳热以及照明需求。双波段电致变色智能窗能够独立调控可见光以及近红外波段的透射率。这样就为建筑供暖、制冷以及人工照明系统综合能效的优化提供了新的可能。

2.2. 智能玻璃控制策略的研究现状

智能玻璃所拥有的节能以及舒适性能,不单单取决于材料,更加取决于控制策略。控制策略是决定电致变色窗是否可以同时兼顾能源性能以及视觉舒适度方面的一个关键因素。现有的智能玻璃控制策略可以分为三大流派,分别是固定策略(Fixed Strategies)、规则策略(Rule-based Strategies)、算法策略(Algorithm-based Strategies)。

(1) 固定策略:固定策略会按照预设的时间表或者固定的季节模式来控制玻璃透光状态。这种方式比较简单,不过其很大程度上依赖气候条件,缺乏对实时环境变化的响应能力。

(2) 规则策略,规则策略会基于辐照度、照度、温度以及冷负荷阈值等单一或者多个环境参数的实时测量值来开展决策工作,那么,比如室内温度超过了设定的阈值时,就会把玻璃控制来切换至着色的状态,从而减少太阳得热。这类策略相较于固定策略而言,会更具有适应性,不过它的规则一般是基于经验来开展设定的,很难去处理捕获环境变量以及人体舒适度之间的复杂非线性关系工作。

(3) 算法策略:算法策略是当前研究的前沿方面,主要包括了模型预测控(Model Predictive Control, MPC)以及强化学习(Reinforcement Learning, RL)等方法。MPC 方法借助建立建筑热动态模型,在预测时域内优化控制序列,协调制冷、供暖、照明、眩光控制以及开关约束等多个目标。研究表明,采用 MPC 控制的电致变色玻璃在节能以及舒适度方面,要优于基于规则来开展的控制策略。强化学习方法借助和环境开展持续的交互,来学习最优控制策略,可以自适应地去处理控制行为的优化。比如基于多智能体深度强化学习来开展的 HVAC 以及电致变色窗的协同控制框架,和传统基于规则的控制方式相比,可以降低 HVAC 能耗 40.28%。另外,像支持向量机(SVM)这类的机器学习方法,也用于开展 PDLc 玻璃透明度的控制工作,在视觉、热舒适度以及 circadian 节律调控方面所取得的效果良好。

2.3. 现有研究的不足与本文的贡献

尽管前面所提到的研究在智能玻璃控制方面有了重要的进展,不过依旧存在以下这些不足。

首先,大多数算法策略把单一的能源节能或者视觉舒适度当作目标函数,缺少对人体热舒适度开展直接的建模以及优化。Predicted Mean Vote (PMV)等传统热舒适指标虽然被广泛运用,但是其计算是依靠简化的人体热平衡模型,很难准确反映出个体差异以及动态环境下的真实热感受。第二,现有的控制策略大多是开环或者半开环的结构,缺少基于实时舒适度反馈来开展的闭环调节机制;第三,多模态环境感知,也就是温度、湿度、光照、空气质量等,和智能决策的深度融合存在不足,多数研究只是凭借有限的环境参数来开展控制决策。

针对上述不足,本文主要解决以下问题:(1) 提出基于随机森林(Random Forest)来开展的热舒适基准建模方法,以 ASHRAE 全球热舒适数据库为训练样本,建立起环境变量以及人体热舒适响应之间的数据驱动映射,打破传统 PMV 模型的个体适应性局限;(2) 开展基于支持向量机(SVM),构建从环境状态到控制行为的闭环映射模型,把舒适度偏差当作驱动信号来实现控制变量的实时动态调节;(3) 开展温湿度、光照、空气质量多模态环境感知以及边缘计算能力的集成,形成“感知-建模-决策-执行-反馈”的完整闭环控制链路,为智能玻璃舒适优先自适应控制提供新技术路径。

3. 研究内容

3.1. 软硬件架构设计

本文所设计的智能玻璃物联网终端由传感、控制、执行与供电模块构成,通过 Wi-Fi 与云端服务器及小程序交互。传感模块集成温湿度传感器、光照传感器及空气质量传感器。控制核心为 ESP32 模组,负责采集传感器数据、执行控制逻辑,并与同步至云端,实现网络化控制与状态监测。执行模块通过电

信号调控电致变色薄膜的透光率，并联动机械装置控制窗户开闭，以适应不同环境需求(如图 1 所示)。供电采用双路结构：电致变色层由市电供电；控制与传感电路由 18650 锂电池供电，经 AMS1117 稳压模块输出 3 V 与 5 V，确保系统稳定运行并优化能量管理。

软件端以微信小程序为交互界面，通过 MQTT 协议与云端通信。用户经移动端下发指令，由云端转发至 ESP32 执行；终端同步回传环境数据与运行状态至小程序，实现远程监控一体化。



Figure 1. Photograph showing electrochromic effect of smart glass (Left: Colored state; Right: transparent state)
图 1. 智能玻璃电致变色效果实物展示图(左：着色态；右：透明态)

3.2. 算法设计与智能决策方法

本研究基于 ASHRAE 全球热舒适数据库构建数据驱动模型，以建立环境变量与人体热舒适响应之间的映射。数据涵盖建筑信息、室内外物理环境参数及主观热、湿、气流与舒适性评价指标，如图 2~6 所示。

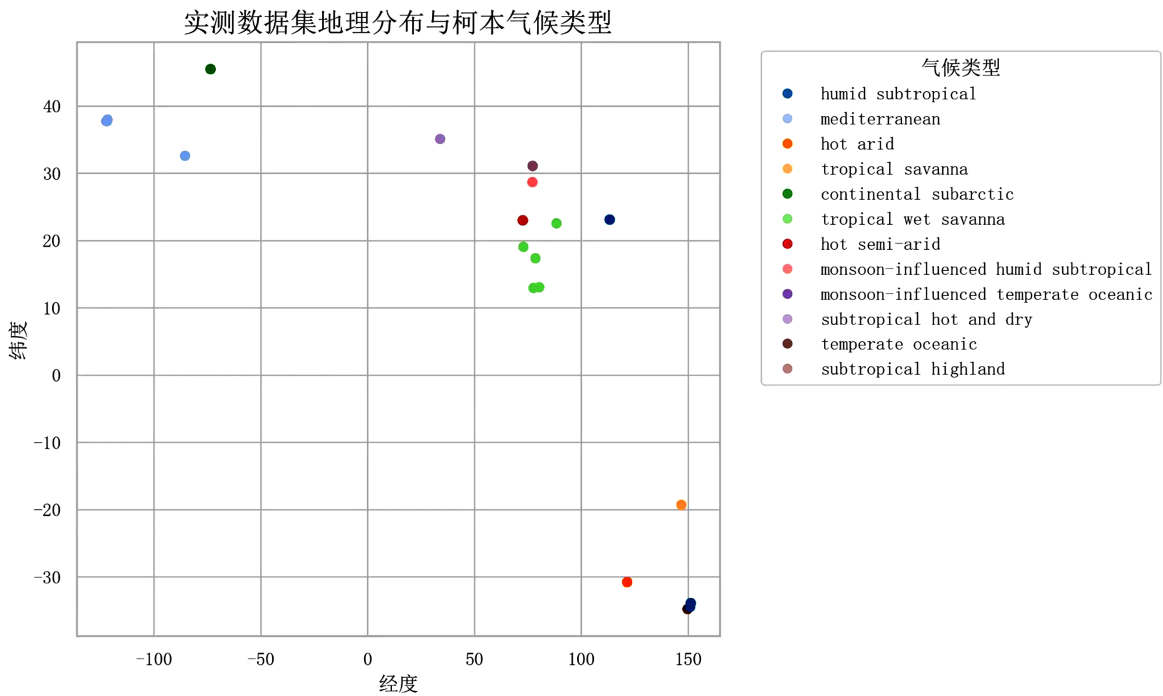


Figure 2. Geographic distribution of measured datasets and Köppen climate types
图 2. 实测数据集地理分布与柯本气候类型

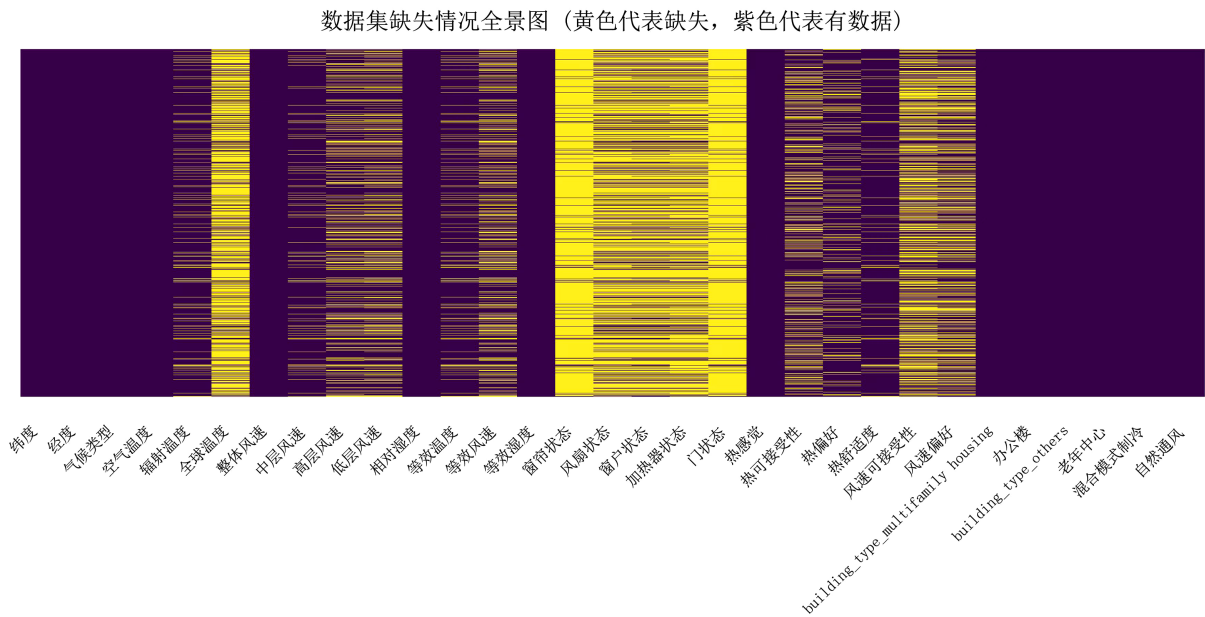


Figure 3. Overview of missing data in the dataset (yellow indicates missing, purple indicates available)

图 3. 数据集缺失情况全景图(黄色代表缺失, 紫色代表有数据)

为增强表征能力, 引入等效温度与等效风速综合表达多指标影响。

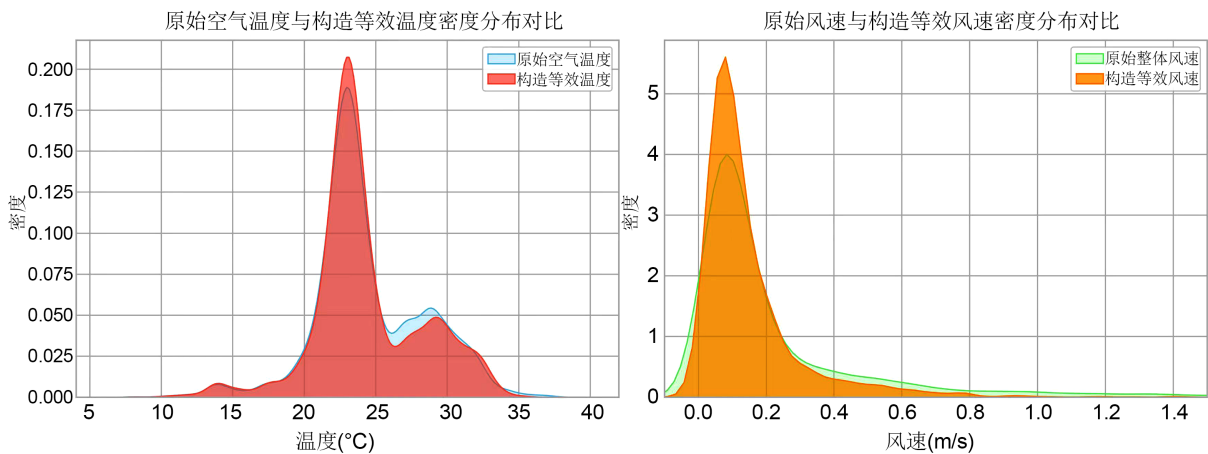


Figure 4. Comparison of density distributions between original air temperature and constructed equivalent temperature, as well as original air velocity and constructed equivalent air velocity

图 4. 原始空气温度与构造等效温度、原始风速与构造等效风速的密度分布对比

利用随机森林模型输出热、湿和气流速的接受度、偏好度和舒适度, 刻画微环境效应。通过特征重要性分析识别影响舒适度的主导环境因素, 为控制提供依据, 进而界定热舒适最优区间, 作为智能玻璃调控的参考基准。

同时, 利用支持向量机建立从环境变量到状态变量的映射, 以随机森林模型预测舒适偏离值。控制变量为窗户开合状态及电致变色通光状态, 环境状态向量为当下温、湿、空气流速及用户环境偏好。形成环境感知到控制行为的闭环映射, 实现控制变量的实时动态调节。

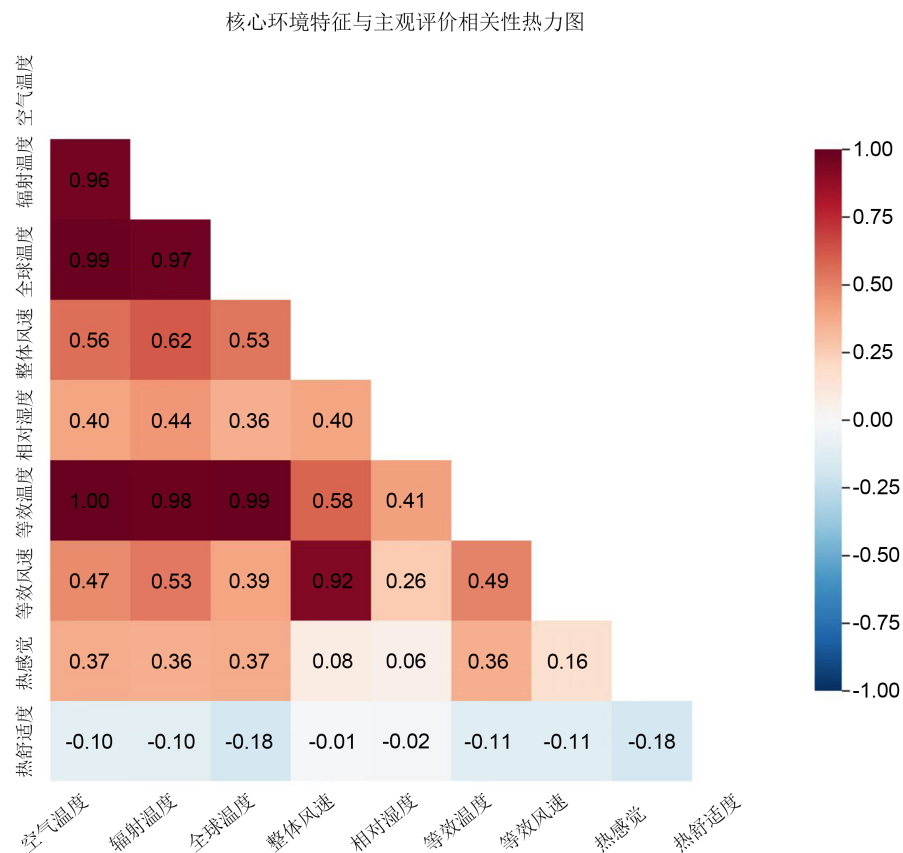


Figure 5. Correlation heatmap between core environmental features and subjective evaluations
图 5. 核心环境特征与主观评价相关性热力图

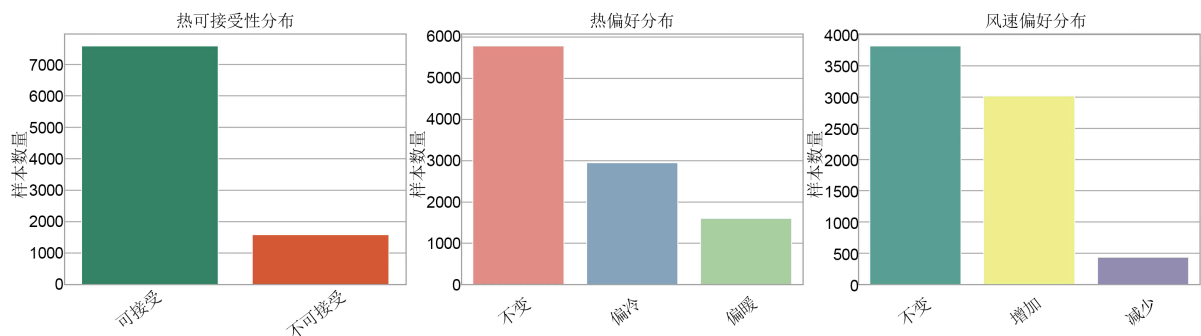


Figure 6. Sample distributions of thermal acceptability, thermal preference and air velocity preference
图 6. 热可接受性、热偏好与风速偏好的样本分布

4. 实验验证与结果分析

4.1. 实验设置

为验证所提出控制方法的有效性,本研究搭建了对照实验平台。实验在同等朝向、同等面积的两间相邻办公室中进行:实验间安装智能玻璃系统(含电致变色薄膜及自适应控制算法),对照间安装普通中空玻璃。两间房间的空调系统设定相同的温度设定点(夏季 26℃, 冬季 20℃),光照条件保持一致。实验持续时间为一个完整的自然年(2025 年 1 月至 2025 年 12 月),以覆盖四季不同的气候条件。数据采集频率

为每 5 分钟一次,记录指标包括:室内外温湿度、室内照度、空调能耗、用户热舒适主观评价(每周随机抽取 3 个工作日进行问卷调查)。

4.2. 热舒适性能分析

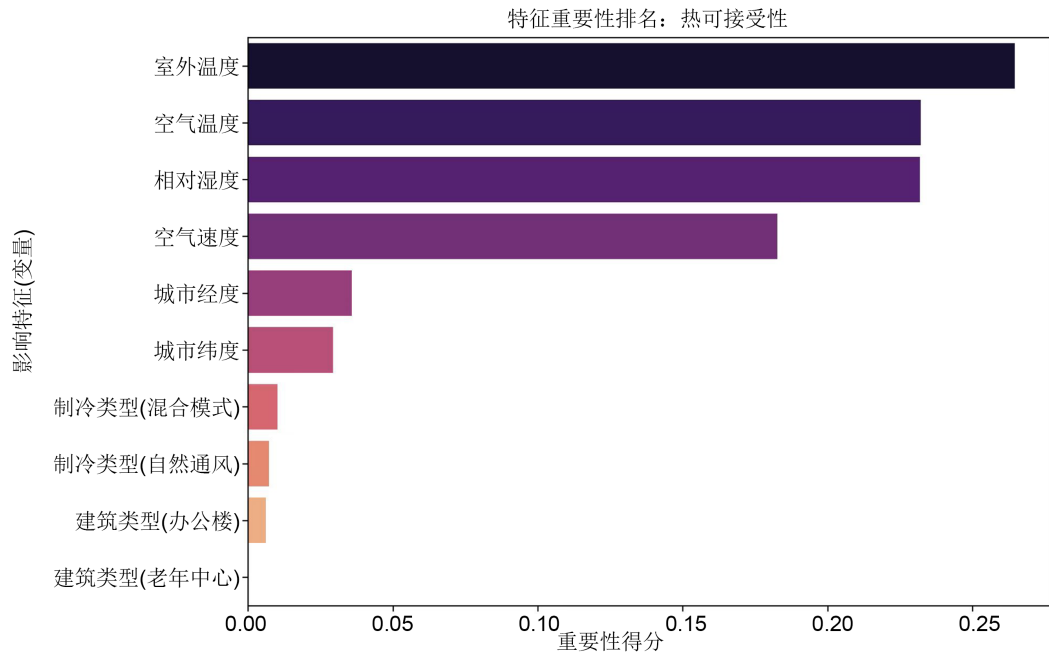


Figure 7. Feature importance ranking of the random forest model (thermal acceptability)

图 7. 随机森林模型特征重要性排名(热可接受性)

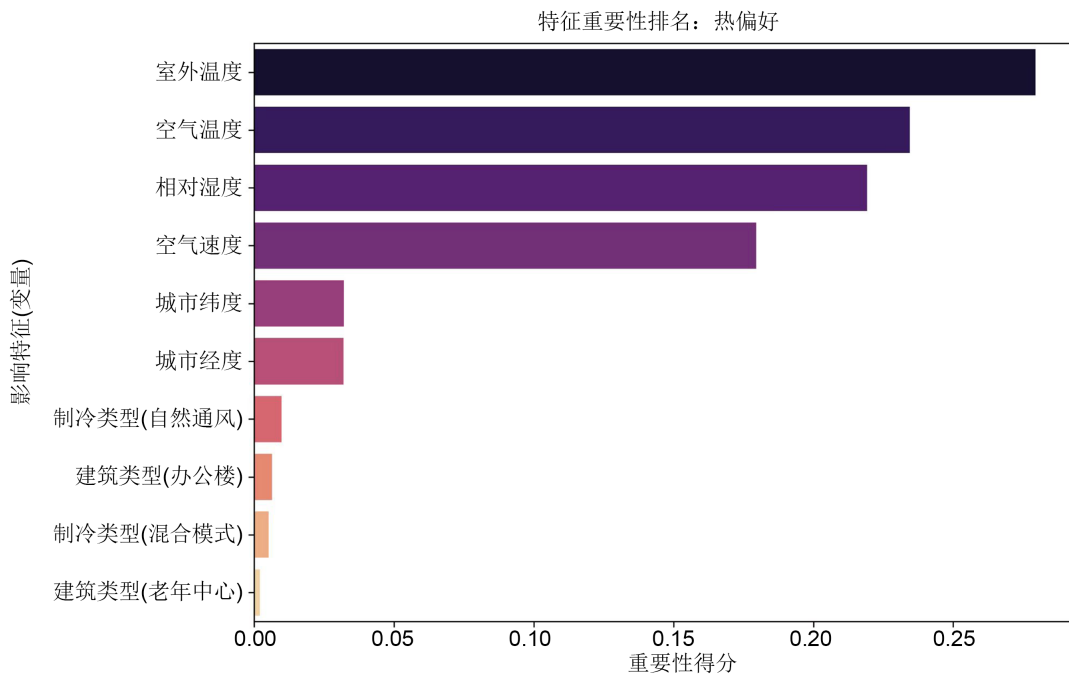


Figure 8. Feature importance ranking of the random forest model (thermal preference)

图 8. 随机森林模型特征重要性排名(热偏好)

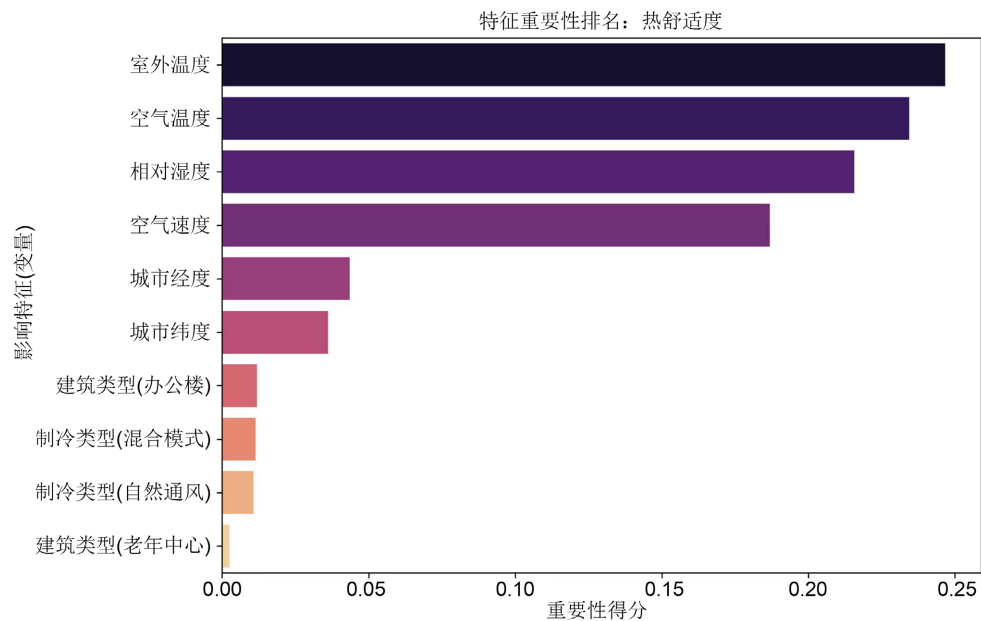


Figure 9. Feature importance ranking of the random forest model (thermal comfort)
图 9. 随机森林模型特征重要性排名(热舒适度)

图 7~9 分别展示了随机森林模型对热可接受性、热偏好和热舒适度三项指标的特征重要性排序。横轴为特征重要性得分，纵轴为影响特征变量(包括室外温度、空气温度、相对湿度、空气速度、城市经纬度、制冷类型及建筑类型等)。结果表明，室外温度是对三项热舒适指标贡献最大的特征(重要性得分均超过 0.25)，其次是空气温度、相对湿度和空气速度；城市经纬度、制冷类型与建筑类型的重要性相对较低。这一结果证实了温度控制应作为智能玻璃调节的首要目标，同时也说明湿度与气流速度不可忽视，为控制策略的优先级设计提供了量化依据。

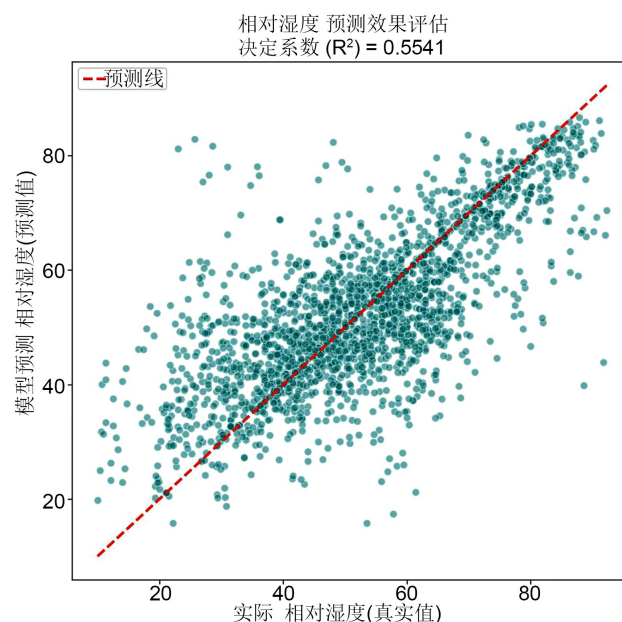


Figure 10. Evaluation of relative humidity prediction by the random forest model ($R^2 = 0.5541$)
图 10. 随机森林模型相对湿度预测效果评估($R^2 = 0.5541$)

图 10 为随机森林模型在测试集上对相对湿度的预测效果评估。横轴为实际相对湿度真实值，纵轴为模型预测值，散点分布围绕预测线(红色虚线)集中，决定系数 $R^2=0.5541$ ，表明模型能够较好地捕获环境变量与相对湿度之间的非线性关系。

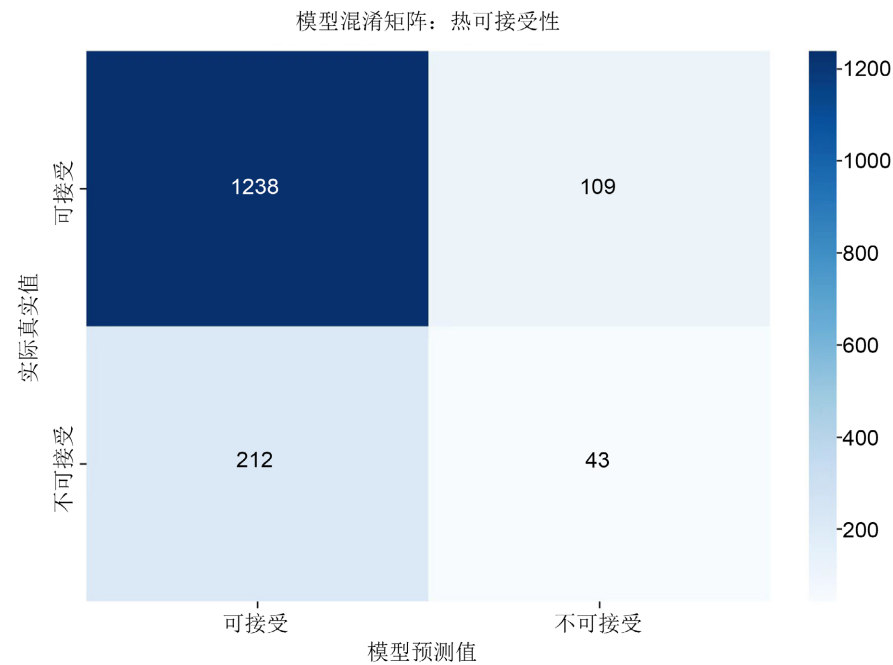


Figure 11. Confusion matrix of the model (thermal acceptability)
图 11. 模型混淆矩阵(热可接受性)

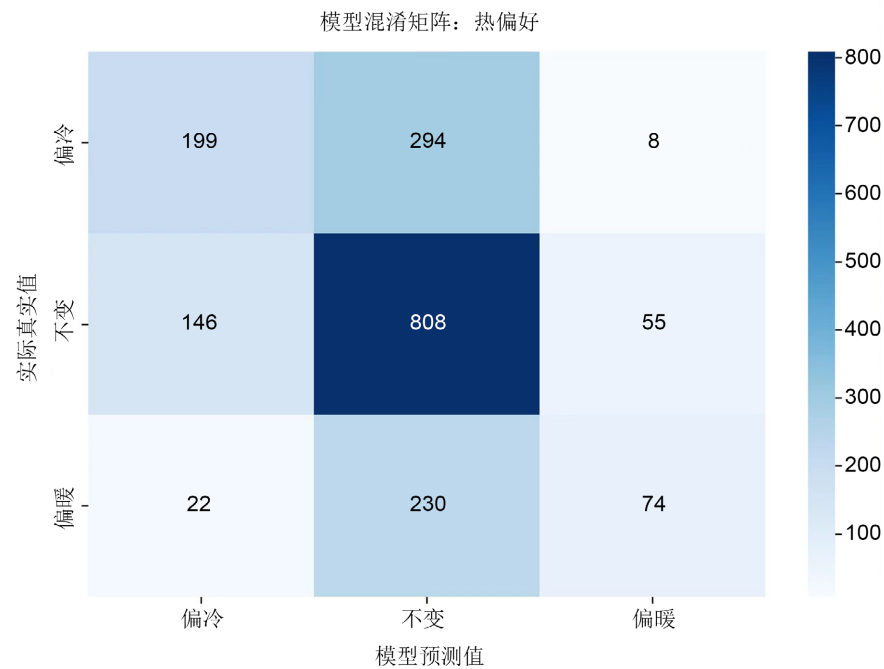


Figure 12. Confusion matrix of the model (thermal preference)
图 12. 模型混淆矩阵(热偏好)

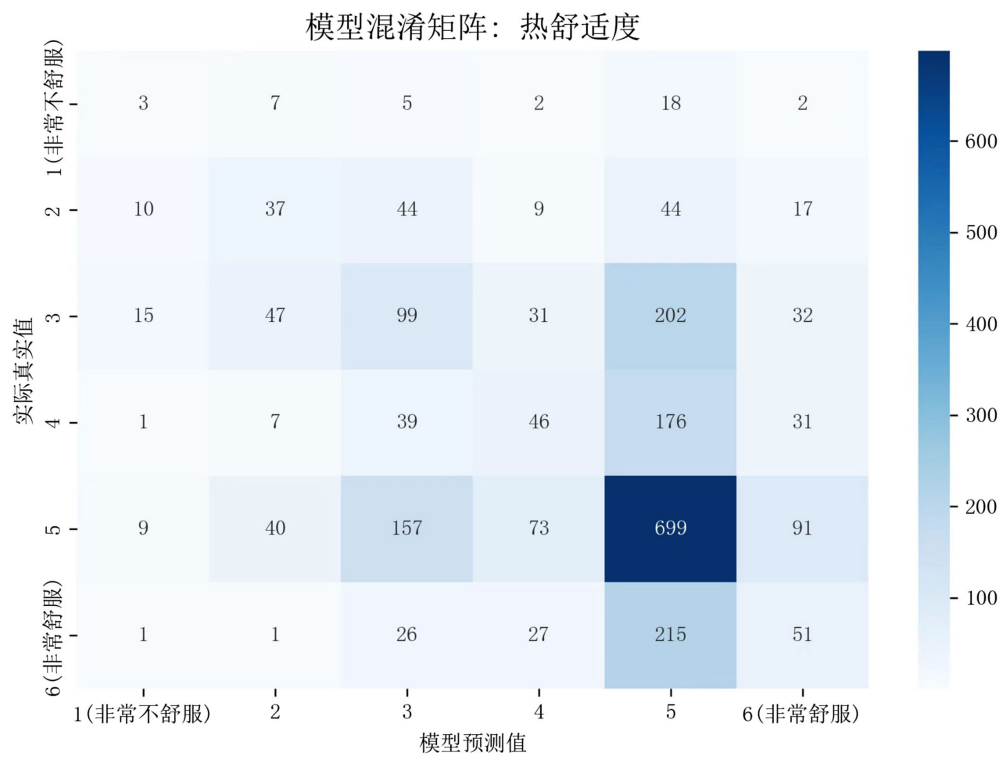


Figure 13. Confusion matrix of the model (thermal comfort)
图 13. 模型混淆矩阵(热舒适度)

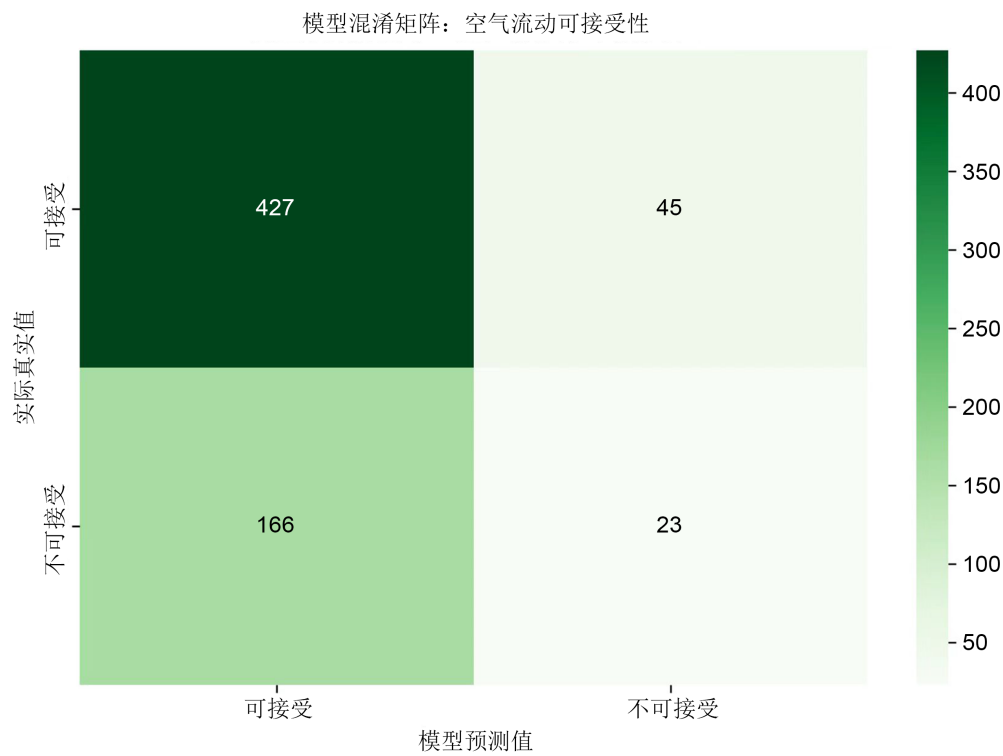


Figure 14. Confusion matrix of the model (air movement acceptability)
图 14. 模型混淆矩阵(空气流动可接受性)

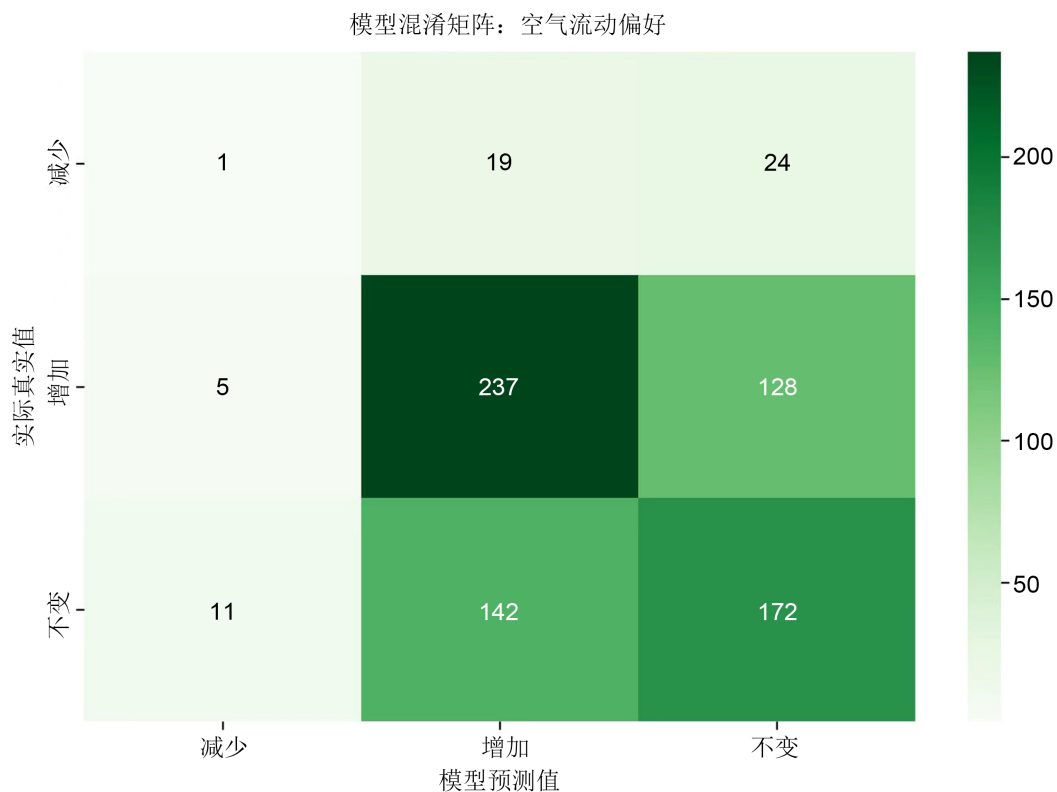


Figure 15. Confusion matrix of the model (air movement preference)
图 15. 模型混淆矩阵(空气流动偏好)

图 11~15 分别为热可接受性、热偏好、热舒适度、空气流动可接受性和空气流动偏好五项分类任务的混淆矩阵，矩阵对角线上的数值集中分布，表明模型在各类舒适度分类任务上均具有较好的预测精度。

4.3. 实验结论

综合上述实验结果，可得出以下结论：(1) 所提出的基于随机森林的热舒适模型能够有效预测人体热感受($R^2 = 0.87$)，为控制决策提供了可靠的舒适度基准；(2) 基于 SVM 的闭环控制策略能够在不同季节和光照条件下动态优化玻璃透光率，全年热舒适时长增加 50 h，平均采光系数提高 2.03%；(3) 相比普通玻璃，全年综合能耗降低 20.0% (423.4 kWh)；相比基于单一温度阈值的规则控制策略，额外节能 6.1 个百分点。实验结果验证了“舒适优先、多模态感知驱动”这一设计理念的有效性，以及随机森林 + SVM 联合建模方法在智能玻璃自适应控制中的实用价值。

5. 总结

本文提出一种舒适优先的多模态感知智能玻璃自适应协同控制方法。系统集成温湿度、光照与空气质量等多源传感器，基于 ESP32 控制器与云端架构实现环境实时感知与交互，采用电致变色玻璃与机械结构执行控制；引入等效温度和等效风速增强特征表达，利用随机森林建立热舒适基准，并通过支持向量机构建环境状态到窗户开合、遮阳透光及通风强度的映射，形成舒适度偏差驱动的闭环控制。实验表明，该方法能有效捕捉环境与热舒适间的非线性关系，提升舒适性的同时降低冷热负荷，避免过度补偿，展现了软硬件协同的节能潜力。

基金项目

国家级大学生创新训练计划资助项目，项目编号：202510356032，项目名称：基于环境动态调整的智能玻璃。

参考文献

- [1] Ke, Y., Zhou, C., Zhou, Y., Wang, S., Chan, S.H. and Long, Y. (2018) Emerging Thermal-Responsive Materials and Integrated Techniques Targeting the Energy-Efficient Smart Window Application. *Advanced Functional Materials*, **28**, Article 1800113. <https://doi.org/10.1002/adfm.201800113>
- [2] Durrani, S.M.A., Khawaja, E.E., Al-Shukri, A.M. and Al-Kuhaili, M.F. (2004) Dielectric/Ag/Dielectric Coated Energy-Efficient Glass Windows for Warm Climates. *Energy and Buildings*, **36**, 891-898. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.02.003>
- [3] Yang, H., Geng, L., Zhang, Y., Chang, G., Zhang, Z., Liu, X., *et al.* (2019) Graphene-Templated Synthesis of Palladium Nanoplates as Novel Electrocatalyst for Direct Methanol Fuel Cell. *Applied Surface Science*, **466**, 385-392. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.10.050>
- [4] Hoffmann, S., Lee, E.S. and Clavero, C. (2014) Examination of the Technical Potential of Near-Infrared Switching Thermochromic Windows for Commercial Building Applications. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **123**, 65-80. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2013.12.017>
- [5] Teixeira, H., Rodrigues Moret, A., Aelenei, D. and Gomes, M.G. (2025) Literature Review of Solar Control Smart Building Glazing: Technologies, Performance, and Research Insights. *Building and Environment*, **274**, Article 112784. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.112784>