

文章编号:0253-4339(XXXX)XX-0001-09

doi: 10.12465/issn.0253-4339.20260707002

基于动态过热度驱动多联式空调精准控温关键技术

李倍宇 廖敏 赵倩 单联瑜 吴庆壮 张杰

(小米科技(武汉)有限公司 武汉 430010)

摘要 为解决现有多联机控温效果无法满足家用复杂使用场景舒适性的问题,本文基于多智能体强化学习算法,提出动态过热度驱动的自适应精准控温方法,综合考虑机组启动、快速降温及稳态运行3个不同温控阶段的机组运行特征及房间温度响应特征,分阶段差异化适配电子膨胀阀开度与室内机过热度的调控方案,并进行了实验验证分析。结果表明:搭载本文控温技术的受试样机,降温响应速度 ≥ 0.45 °C/min、控温波动 < 0.3 °C,在室温达标时长与稳态控温稳定性上,均较定蒸发温度和定过热度2类传统算法表现出显著性能优势,综合降温速率提高38.4%,控温精度提高42.2%。

关键词 多联式空调;温度控制;多智能体强化学习

中图分类号: TB657.2; TP181

文献标识码: A

Dynamic Superheat-Driven Key Technology for Precise Temperature Control in Multi-Split Air Conditioning Systems

Li Beiyu Liao Min Zhao Qian Shan Lianyu Wu Qingzhuang Zhang Jie

(Xiaomi Technology (Wuhan) Co., Ltd., Wuhan 430010, China)

Abstract Existing multi-split air conditioning systems fail to provide satisfactory thermal comfort in complex residential operating scenarios. To address this limitation, this study proposes a dynamic superheat-driven adaptive precision temperature control strategy employing a multi-agent reinforcement learning (MARL) algorithm. The strategy accounts for system operational characteristics and room temperature dynamics across three distinct control stages, namely, start-up, rapid cool-down, and steady-state operation, and implements a stage-specific control scheme for electronic expansion valve (EEV) opening and indoor-unit superheat. Experimental validation demonstrates that the prototype incorporating the proposed strategy achieves a cool-down response rate of ≥ 0.45 °C/min and a temperature fluctuation of < 0.3 °C. Compared with two conventional control strategies—fixed evaporation temperature and fixed superheat—the proposed strategy exhibits significant advantages in both setpoint attainment time and steady-state stability, with an improvement of overall cool-down rate by 38.4% and temperature control accuracy by 42.2%.

Keywords multi-split air conditioners; precise temperature control; multi-agent reinforcement learning

中国家用电器协会发布的《中国房间空气调节器产业技术路线图(2024年版)》中明确^[1],控温精度提升、室温波动抑制及室内热舒适优化是高端空调器核心研发方向。依据GB 50736—2012《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》^[2],人员长期逗留的舒适性空间空调设计温度,夏季取值24~26 °C。工程设计与机组性能研发中,普遍要求将室温波动控制在 ± 1.0 °C,以此营造良好室内热舒适环境。

多联式空调(简称:多联机)传统控制技术存在控制逻辑固化,室内高精度恒温控制方面存在明显

局限^[3],已是行业公认的技术痛点及重点攻关方向。传统控制算法多采用定蒸发温度和定过热度2类定值参数控制模式^[4],不具备全屋动态负荷实时感知^[5]与系统自适应调控能力^[6],难以适配多末端耦合、变负荷、变工况的复杂运行工况,易造成系统供需负荷失配、室内控温精度偏低,进而影响室内热舒适性。由此可知,多联机传统定值参数控制模式已无法适配家庭复杂使用场景下的精准控温需求,成为制约机组高精度恒温控制和运行能效提升落地的核心技术瓶颈。

收稿日期:2026-07-07;修回日期:2026-08-19;录用日期:2026-08-19

责任编辑:王亚薇



移动阅读

基于此,针对固定目标过热度难以适配多联式空调器实际负荷,进而造成室内控温舒适性不足的问题,本文构建基于多智能体强化学习的可变目标过热度调控模型,实现目标过热度的动态自适应调节,提升系统室内控温舒适性,可为多联机智能控制方案设计提供参考。

1 多联式空调控温技术现状

1.1 定蒸发温度控制

定蒸发温度控制为多联机系统经典容量调控策略^[7]。如图1所示,该策略依托实验标定预设蒸发器饱和蒸发温度目标值,运行中以实际蒸发温度与设定值的偏差构建闭环调控回路,动态调节压缩机运行频率,改变制冷剂循环流量,调整蒸发器传热效率,实现蒸发温度工况稳定。该控制方式依托压缩机单维度容量调节适配室内平均冷热负荷,完成基础室温调控,是早期多联机稳态运行主流控制方案。

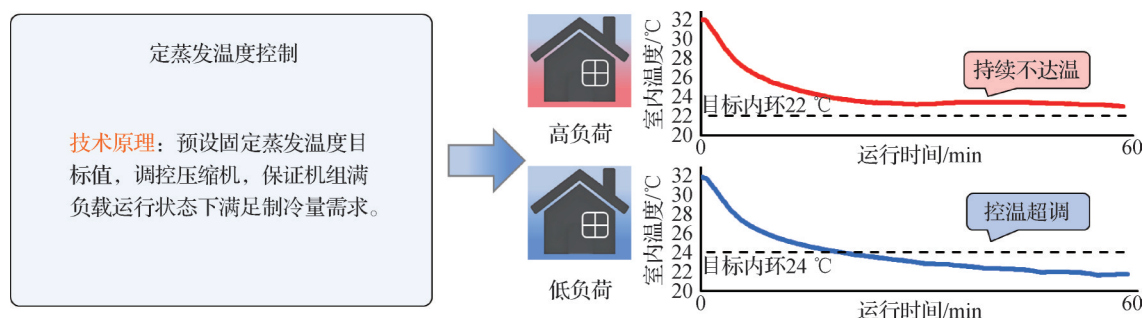


图1 多联机定蒸发温度控制

Fig.1 Multi-split air conditioner constant evaporation temperature control

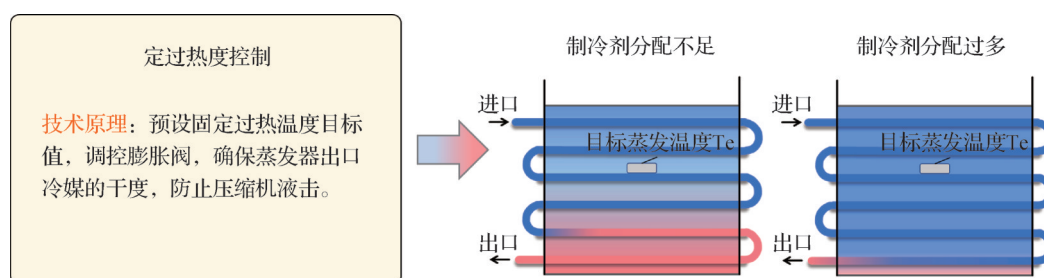


图2 多联机定过热度控制

Fig.2 Multi-split air conditioner fixed superheat control

2 基于动态过热度驱动的自适应精准控温技术

本文提出动态过热度驱动的多智能体自适应精准控温方法,整体系统框架如图3所示。其中,实时负荷预测模块完成运行负荷的在线预测;可变目标过热度模块结合负荷预测结果,为每台室内机输出适配工况的目标过热度给定值,进而调节各支路制

住宅空间存在分区负荷不均、环境扰动频繁、负荷动态波动显著等特点^[8-9],而定蒸发温度控制策略固定、调控模式单一,缺乏负荷自适应调节能力,难以适配家用场景高精度控温需求^[10]。

1.2 定过热度控制

定过热度控制是多联机制冷剂流量的经典调控手段,广泛应用于电子膨胀阀开度调节^[11]。如图2所示,该控制方法预先设定蒸发器出口制冷剂目标过热度,通过实时采集测温点温度与制冷剂饱和温度,计算得到实际过热度,依托设定值与实测值偏差动态调整阀开度,调节流过蒸发器的制冷剂流量。其可使蒸发器出口制冷剂稳定维持过热状态,避免回液造成压缩机液击^[12],稳定蒸发器热力参数,保障制冷系统稳态运行。但该策略优先保障设备运行安全,采用全局固定过热度进行调控,未能适配复杂多变的实际工况,无法同步优化换热性能与室内控温效果,工况适配性较差^[13]。

冷剂分配状态;多智能体协同博弈模块实现压缩机、电子膨胀阀等机组核心执行器的协同优化调控。

本文构建负荷预测、差异化过热度调控、多智能体协同博弈相结合的3层递进式多联机调控体系。首先,基于时序差分在线修正算法搭建房间动态负荷预测模型,通过实时运行数据迭代更新模型参数,实现室内冷热负荷的高精度动态辨识。根据负荷辨识结果对房间负荷进行高、中、低3级划分,建立各室

内机独立的过热度调控机制,目标过热度调控区间为1~5℃。遵循负荷匹配原则,高负荷房间匹配低过热度以充分释放蒸发器换热潜能,低负荷房间匹配高过热度以抑制换热冗余与制冷剂过量供给,实现制冷剂按需分配与过热度动态自适应,有效弥补了传统统一过热度调控无法适配多房间变负荷工况的缺陷。

在此基础上,将多联机协同调控过程建模为马尔可夫决策过程,引入分层注意力 Actor-Critic 多智能体强化学习框架,解决外机压缩机与多路室内机电子膨胀阀的强耦合协同调控难题。在多智能体的控制框架中将膨胀阀与压缩机设为独立智能体,通过感知层实时采集室温、过热度、房间负荷及环境扰动等状态参数;融合双层特征函数与双重注意力机制的 Actor 策略网络挖掘设备时序关联特征,输出压

缩机运行频率、支路阀开度等控制指令;Critic 评估网络构建局部-全局双层价值结构与多维度复合奖励函数,从控温精度、系统能效、过热度稳定性、多机协同均衡性维度完成策略量化评估,损失函数兼顾局部运行收益、系统全局收益与策略熵约束。通过时序差分迭代优化调控策略,有效解耦局部制冷剂调控与整机温控、能效优化目标,实现系统分布式协同调控。

相较于传统固定过热度控制策略,本文方法的核心创新体现在2方面:一是摒弃传统整机静态同质化调控模式,建立负荷驱动的差异化动态过热度调控机制,依托精准负荷预测实现制冷剂前置按需分配;二是通过多智能体协同博弈算法实现压缩机与电子膨胀阀协同调控,弱化室温、阀开度与过热度的强耦合关系,动态追踪系统最优运行工况,显著提升多联机控温精度与变负荷工况运行稳定性。

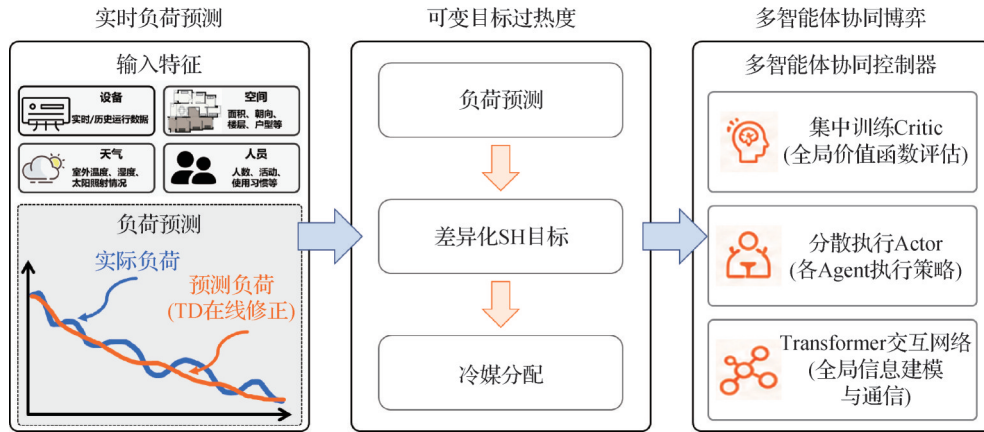


图3 自适应控温模型框架

Fig.3 Adaptive temperature control model framework

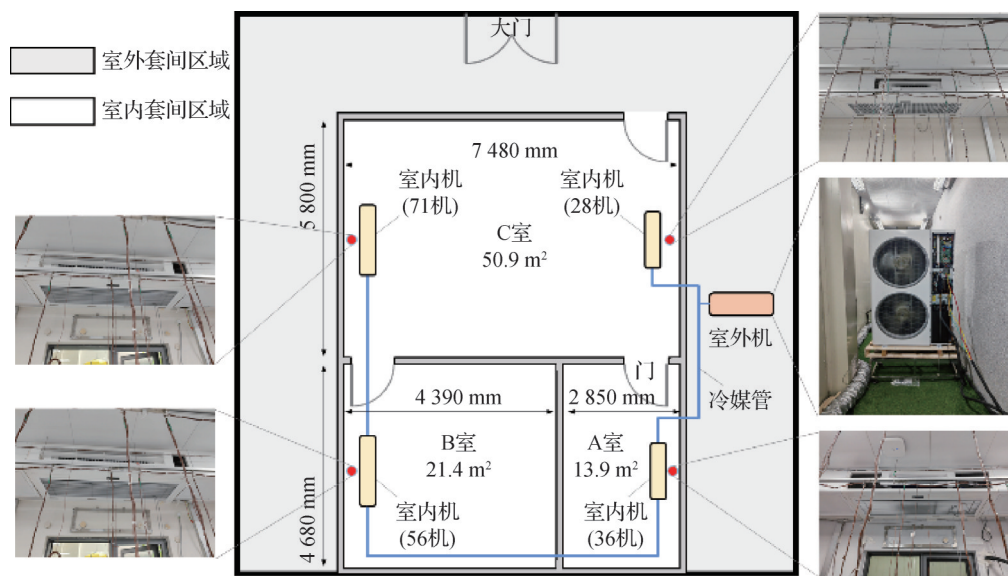
3 实验结果分析

3.1 实验装置及测试方法

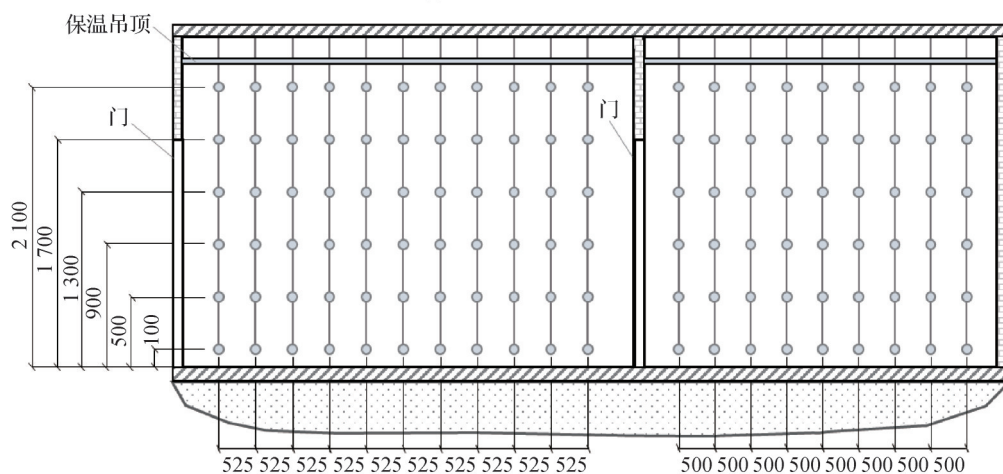
为验证本课题自研多联机控温技术在实际应用工况下的运行性能及控温效果,本次实验依托环境模拟实验室开展测试验证工作。实验室平面布局如图4(a)所示,采用砖混结构型式;围护墙体采用国家标准实心烧结红砖,墙体厚度为240 mm;外窗采用双层中空玻璃密闭窗;入户门为保温密闭实体门,门框缝隙做密封封堵处理。实验室内侧区域共有3个房间,室内净高为2.9 m;A房间室内面积为13.9 m²,窗墙比为0.09;B房间室内面积为21.4 m²,窗墙比为0.12;C房间室内面积为50.9 m²,窗墙比为0.12;室内房间采用标准T型热电偶采集各测点的空气干球温度,在A、B、C这3间实验房间内,沿竖直方向统一布设6层温度测点,布设高度依次为距地面0.1、0.5、

0.9、1.3、1.7、2.1 m(图4(b));水平平面内分别按照3排9列、7排7列和10排11列形式完成测点排布(图4(c))。可知A、B、C房间的温度测点分别有162、294和660个。

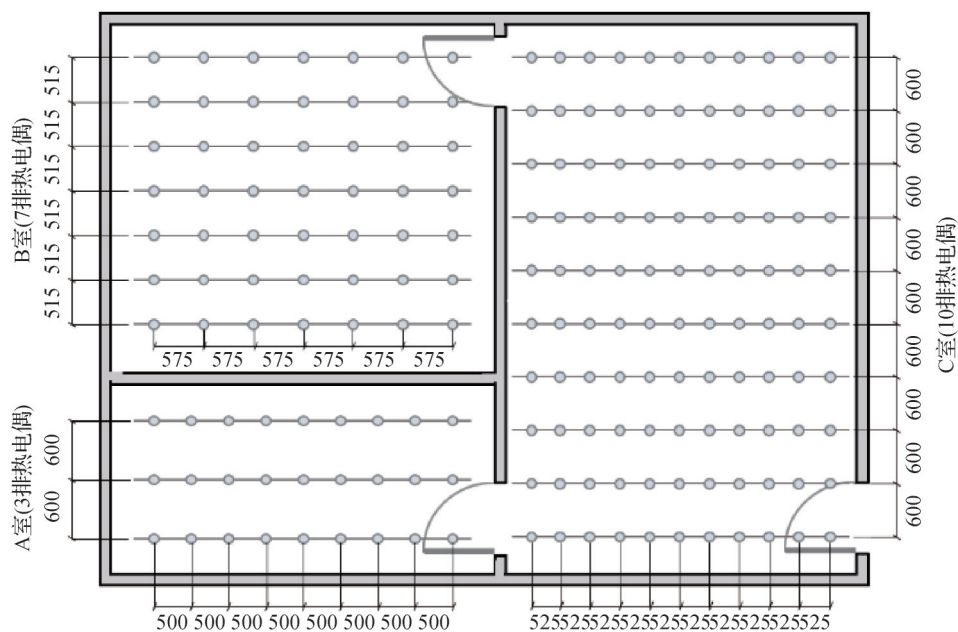
为对比本课题节能技术与传统控制算法的性能差异,选取一套多联机空调机组作为实验平台,在相同实验工况和相同设定参数下对搭载AI算法、传统算法1(定蒸发温度)和传统算法2(定过热度)的同一套空调机组进行控温及耗电量测试。室外工况参数为35℃干球/24℃湿球,室内工况参数为32℃干球/21℃湿球,内墙温为32℃,实验时长4 h。实验期间,室外工况装置稳定维持室外侧规定工况参数;室内工况装置于实验起始阶段停止调控,室内空气参数完全由受试空调机组自主调控。考虑到多联机空调在实际使用过程中有不同内机设定相同温度和不同内机设定不同温度2种典型场景,本文在实验方案中



(a) 实验室平面布局



(b) 实验室垂直方向热电偶布置



(c) 实验室水平方向热电偶布置

图 4 环境模拟实验室示意图

Fig.4 Schematic diagram of the environmental simulation laboratory

进行如下设计:实验1中A、B、C房间的目标内环温均设定为26℃;实验2中A、B、C房间的目标内环温分别设定为28、24、26℃;2组实验中,被测机组均统一采用制冷模式,风机运行于最高挡位。本实验将受试多联式空调机组室内机安装于实验室室内标准安装机位,室外机安装在实验室室外指定区域。测试期间,各房间的外窗和门均保持关闭状态。

3.2 相同设定温度场景控温效果对比

结合图5与表1的数据,对多房间设定相同室内目标温度条件下的内环控温效果分析:AI算法、传统算法1、传统算法2调控下,A房间平均室内温度依次为26.89、27.29、27.71℃(图5(a));B房间平均室内温度依次为26.52、27.27、27.23℃(图5(b));C房间平均室内温度依次为26.54、26.79、26.80℃(图5(c))。数据表明,AI算法可获得最低的室内平均温度,传统算法1控温效果处于中等水平,传统算法2对应的室内平均温度最高。

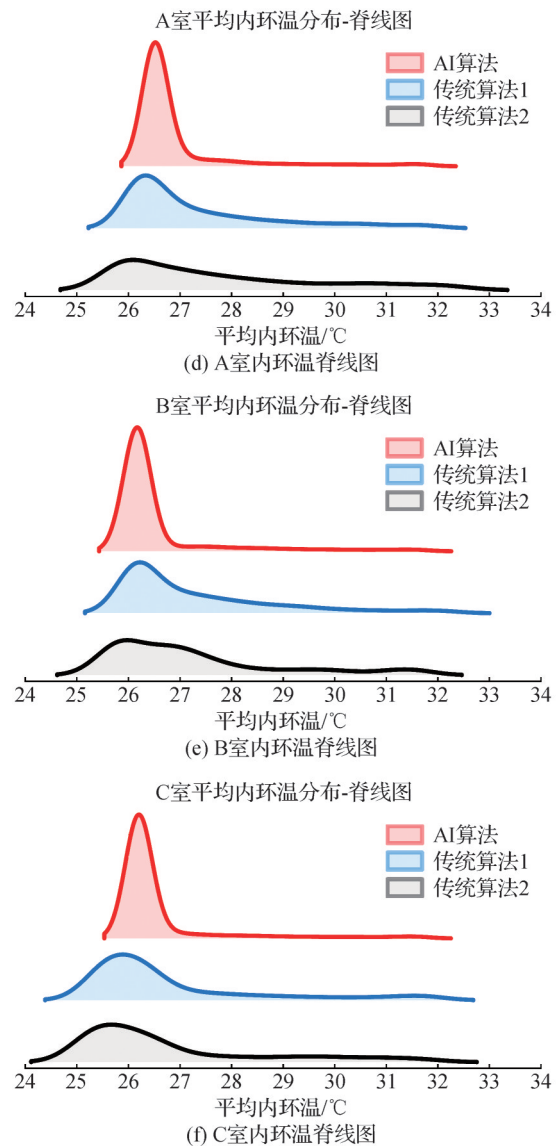
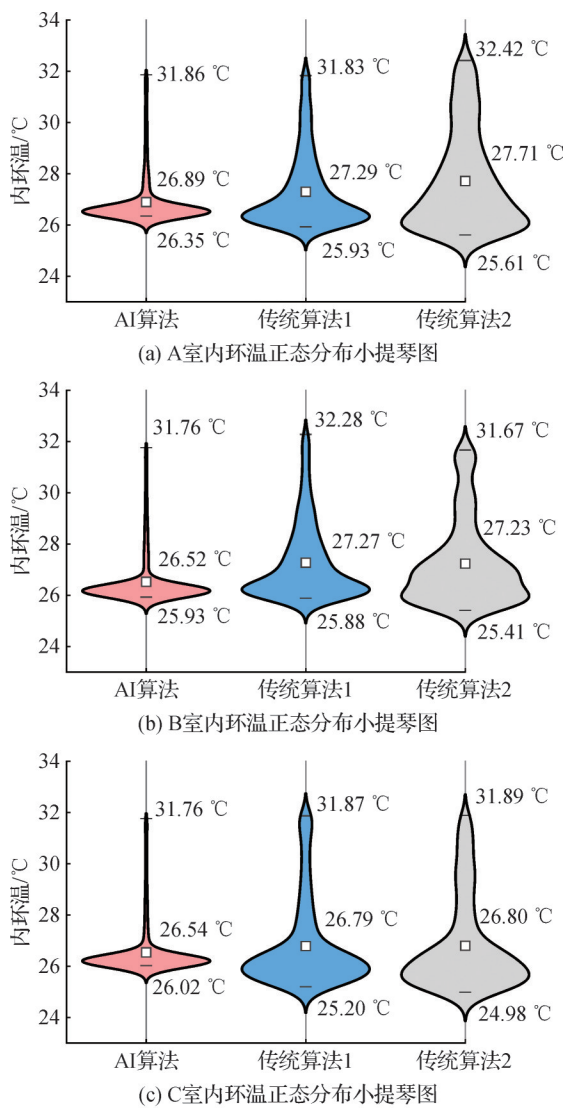


图5 相同设定温度场景各房间控温
Fig.5 Temperature control in each room under the same set temperature scenario

表1 多房间设定相同温度控温效果对比
Tab.1 Comparison of temperature control effects when setting the same temperature in multiple rooms

算法	房间	控制算法内环温/℃			
		0~10 min	10~20 min	20~60 min	均值
AI算法	A	28.7	26.6	26.5	26.9
	B	23.8	26.0	26.2	26.5
	C	28.2	26.5	26.5	26.5
传统算法1	A	30.1	27.9	26.4	23.7
	B	30.4	28.0	26.4	27.3
	C	31.1	26.8	26.8	26.8
传统算法2	A	31.2	28.9	26.5	27.7
	B	30.4	27.9	26.3	23.3
	C	30.3	26.8	26.8	26.8

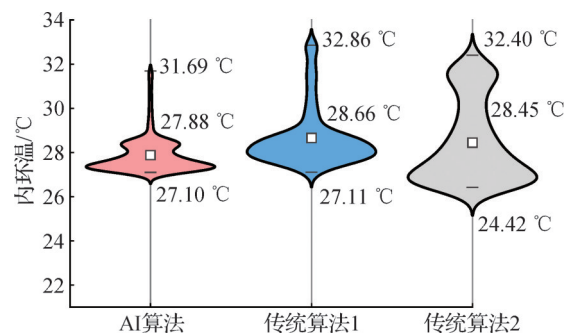
进一步对不同控制算法各运行阶段的控温实验数据进行分析。0~10 min为机组启动控温阶段,全屋平均降温速率测试结果为:AI算法、传统算法1、传统算法2分别为0.53、0.35、0.28 °C/min。对比可知,AI算法降温速率分别为传统算法1的1.51倍、传统算法2的1.89倍。10~20 min快速降温阶段,AI算法全屋平均降温速率降至0.03 °C/min,传统算法1、传统算法2降温速率分别为0.14、0.19 °C/min。该现象源于AI算法调控下室内温度已趋近设定目标值,系统主动降低制冷输出,同时体现出AI算法在室温达标耗时方面显著优于2类传统算法。20~60 min稳态运行阶段,结合图6(d)~(f)及稳态室温标准差统计结果:AI算法控温标准差为0.15 °C,传统算法1、传统算法2分别为0.45、0.67 °C,AI算法稳态控温波动最小,传统算法2的室内温度波动幅度更大。

综上,在多房间统一设定温度的运行工况下,AI算法在降温响应速率、室温达标耗时以及稳态控温稳定性方面,相对于2类传统算法均具备显著的性能优势。

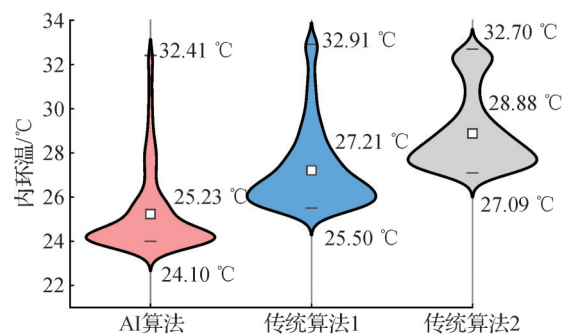
3.3 不同设定温度场景控温效果对比

结合图6与表2的数据,对多房间设置不同室内目标温度条件下的内环控温效果开展分析。AI算法、传统算法1、传统算法2调控下,A房间平均室内温度依次为28.88、28.66、28.45 °C(图6(a));B房间平均室内温度依次为25.23、27.21、28.88 °C(图6(b));C房间平均室内温度依次为26.60、26.89、27.87 °C(图6(c))。实验结果表明,AI算法具备更优的多房间差异化控温精度,传统算法2的差异化控温精度最差。进一步对不同控制算法各运行阶段的控温实验数据开展分析。

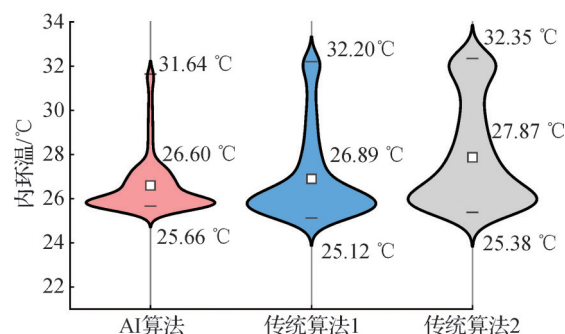
0~10 min为机组启动控温阶段,全屋平均降温速率测试结果:AI算法为0.45 °C/min,传统算法1为0.38 °C/min,传统算法2为0.13 °C/min。对比可知,AI算法降温速率分别为传统算法1的1.18倍、传统算法2的3.46倍。10~20 min快速降温阶段,AI算法全屋平均降温速率降至0.08 °C/min,传统算法1、传统算法2的降温速率分别为0.16、0.24 °C/min。由此可见,在多房间差异化温度设定工况下,AI算法仍可有效缩短室温达标耗时,响应特性优于2类传统算法。20~60 min稳态运行阶段,结合图7(d)~图7(f)及稳态室温标准差统计结果:AI算法调控下A、B、C房间的控温标准差依次为0.22、0.29、0.28 °C;传统算法1调控下A、B、C房间的控温标准差依次为0.44、0.52、0.39 °C;传统算法2调控下A、B、C房间的控温标准差依次为0.68、0.52、0.80 °C。本实验中



(a) A室内环温正态分布小提琴图

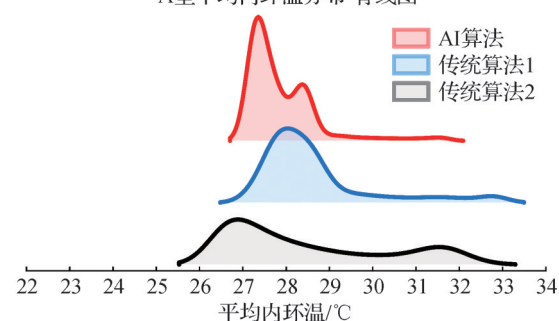


(b) B室内环温正态分布小提琴图



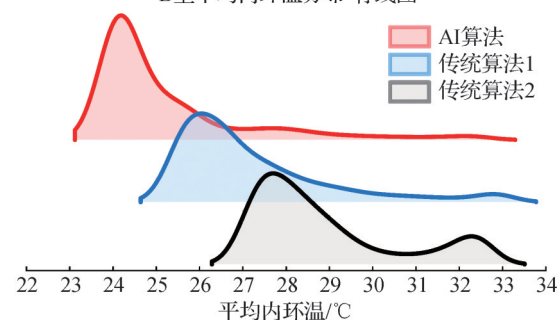
(c) C室内环温正态分布小提琴图

A室平均内环温分布-脊线图



(d) A室内环温脊线图

B室平均内环温分布-脊线图



(e) B室内环温脊线图

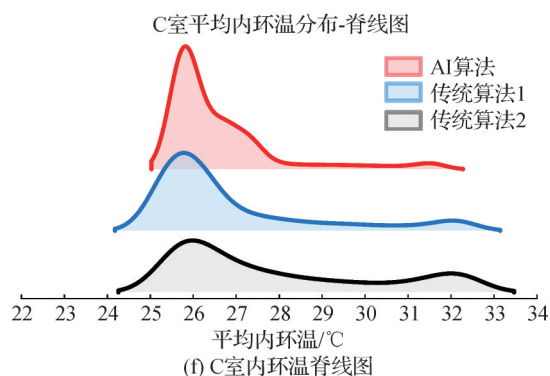


图6 不同设定温度场景下各房间控温

Fig.6 Temperature control in each room under different temperature settings

表2 多房间设定不同温度控温效果对比

Tab.2 Comparison of temperature control effects in multiple rooms with different temperature settings

算法	房间	控制算法内环温/°C			
		0~10 min	10~20 min	20~60 min	均值
AI算法	A	29.2	28.3	27.4	28.9
	B	28.7	25.6	24.3	25.2
	C	28.9	27.0	25.9	26.6
传统算法1	A	31.2	28.6	28.0	28.7
	B	30.5	27.9	26.2	27.2
	C	30.8	27.4	25.8	26.9
传统算法2	A	31.7	29.9	27.3	28.5
	B	32.1	29.7	27.9	28.9
	C	32.0	29.6	26.4	27.9

A、B、C房间的室内目标温度分别为28、24、26℃。对比发现, AI算法可实现更高的房间控温准确度, 差异化精准控温能力显著优于2类传统算法。

综上, 在多房间差异化温度设定运行工况下, AI算法在降温响应速率、室温达标耗时以及稳态控温稳定性方面, 相对于2类传统算法仍具备突出的性能优势。

3.4 多联机室内温控影响因子分析

基于空调热力循环机理, 蒸发温度与室内机过热度是影响室内环境温度调控效果的关键参数^[14], 膨胀阀开度作为核心节流控制参数^[15], 可实现对蒸发温度与室内机过热度的调节。结合上述实测数据分析室内控温效果随膨胀阀开度和室内机过热度的响应规律(表3): 开机0~10 min区间, 膨胀阀开度对室内温度作用效应最为突出; 系统运行20 min后, 该参量对室内温度的影响力度逐步衰减。室内机过热度在开机0~20 min内呈现显著调控作用, 运行时长

超过20 min后, 其温度影响效应明显减弱。相关性规律表明, 开机后的0~10 min阶段, 膨胀阀开度、室内机过热度与室内温度均呈正相关特性; 运行20~60 min区间, 二者与室内温度的相关关系转为负相关。据此可知, 开机初期可适度关小电子膨胀阀开度, 强化节流作用以降低制冷剂温度, 同步合理下调室内机过热度, 使蒸发器维持最优换热工况; 系统稳态运行后期, 需适度增大膨胀阀开度与提升室内机过热度, 抑制室内温度波动。

实验数据表明(图7), 空调机组启动后, 伴随室内温度不断向设定目标温度收敛, 电子膨胀阀开度与室内机过热度整体均呈逐步下降、数据分布趋于集中的变化特征。对不同温控阶段下膨胀阀开度、室内机过热度与室内温度开展线性回归分析可知: 机组开机0~20 min温降阶段, 膨胀阀开度、室内机过热度与室内温度三者间线性相关性显著; 当运行时长超过20 min后, 室内温度逐渐逼近设定值, 三者线性相关特征明显弱化。上述规律表明, 在室内快速降温阶段, 电子膨胀阀开度与室内机过热度对室温具备核心调控作用。

综上所述, 结合温控过程与实际控温效果, 电子膨胀阀开度及室内机目标过热度应构建分阶调控策略。大温差工况下设置较低的目标过热度, 电子膨胀阀采用大开度调节幅值; 进入小温差工况后, 适度提高目标过热度, 电子膨胀阀切换为小幅度精细化调节, 以此兼顾室内温度控制精度与系统运行稳定性。

表3 不同控温阶段室内温度影响因子相关性分析

Tab.1 Correlation analysis of indoor temperature influencing factors at different temperature control stages

双尾显著 检验 r	0~10 min		10~20 min		20~60 min	
	EVI	SH	EVI	SH	EVI	SH
内环温(T_a)	0.940	0.593	0.843	-0.682	-0.353	-0.380

注: 1) $|r|$ (绝对值) <0.3 弱相关; $0.3 \leq |r| < 0.5$ 低度相关; $0.5 \leq |r| < 0.8$ 中度相关; $0.8 \leq |r|$ 高度强相关; 2) EVI表示内机膨胀阀开度, SH表示内机过热度。

4 结论

本文以空调系统热力循环机理为理论基础, 提出一种动态过热度驱动的自适应精准控温方法; 针对多联机不同温控工况下电子膨胀阀参数协同调控难题, 引入多智能体强化学习控制策略, 开展分阶段控温特性与整机性能实验研究, 得到结论如下:

1) 通过多联机室内控温关键影响因子分析表明, 电子膨胀阀开度与室内机过热度不宜采用固定

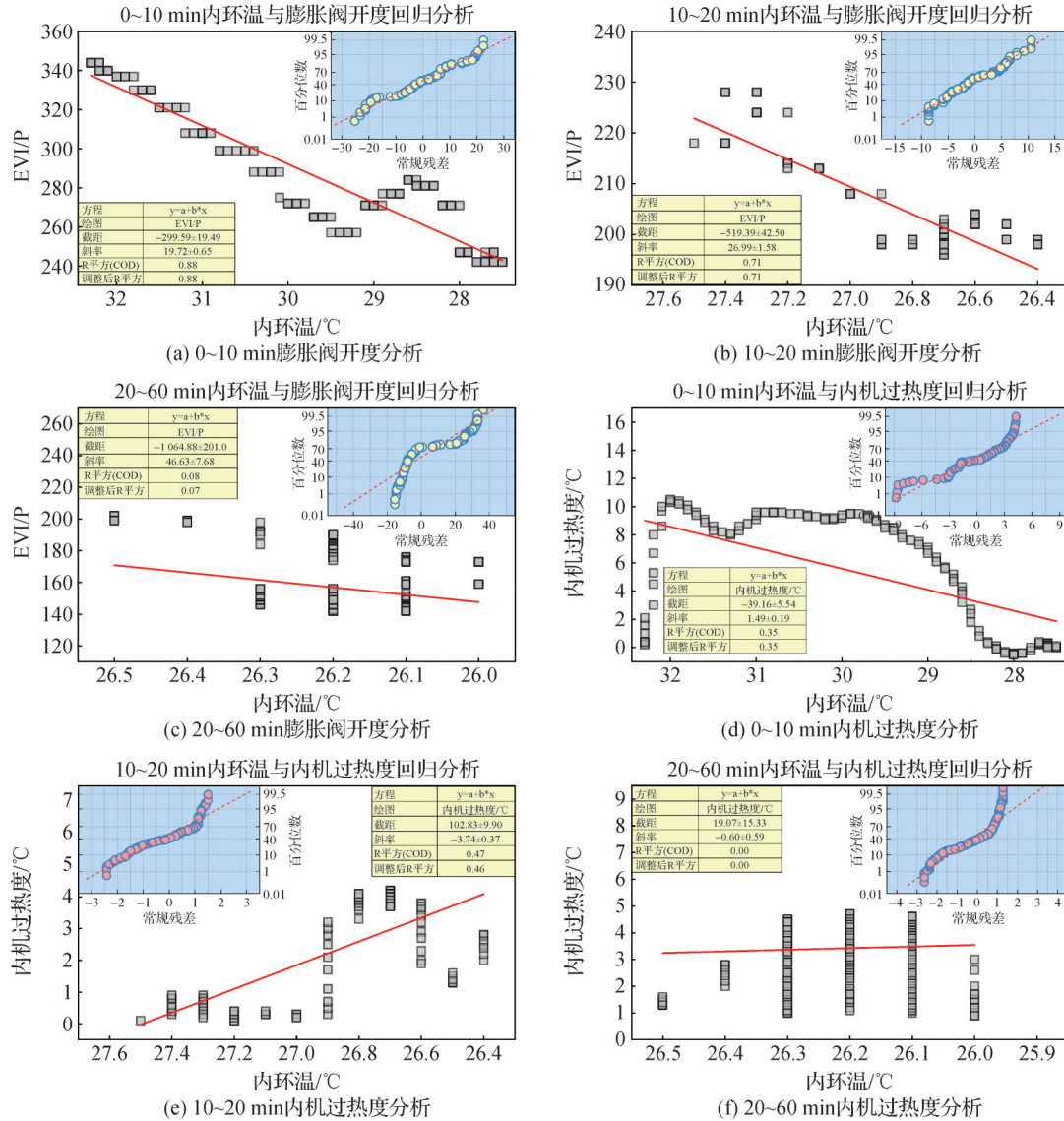


图7 不同控温阶段室内温度影响因子响应特性

Fig.7 Response characteristics of indoor temperature influencing factors at different temperature control stages

调控模式,需依据机组启动、快速降温及稳态运行不同温控阶段的运行特征,制定分阶协同调控方案,方可匹配各阶段差异化控温需求。

2)多房间相同设定温度的全屋平均降温速率数据显示,机组启动阶段,AI算法为0.53 °C/min,传统算法1为0.35 °C/min,传统算法2为0.28 °C/min, AI算法的降温速率分别为两类传统算法的1.51倍与1.89倍;快速降温阶段, AI算法的室温达标响应时长显著优于2类传统算法;稳态运行阶段, AI算法的室温控温标准差仅为0.15 °C,传统算法1和传统算法2分别为0.45 °C和0.67 °C,稳态控温稳定性提升效果显著。

3)多房间不同设定温度的实验结果表明, AI算法仍具备良好适配性,机组启动阶段, AI算法的降温速率为0.45 °C/min,分别是传统算法1和传统算法2

的1.18倍与3.46倍;快速降温阶段, AI算法可有效缩短室温达标时间,温度响应特性更优;稳态运行阶段, 3个房间AI算法的室温控温标准差的平均值≤0.29 °C,传统算法1和传统算法2分别为≥0.39 °C和≥0.52 °C, AI算法实现不同房间精准控温性能显著优于2类传统算法。

本文受湖北省技术创新计划项目“基于小米AI大模型的空调运行节能关键技术研究及应用”(2024BAB045)资助。(The project was supported by Hubei Provincial Technology Innovation Program Project "Research and Application of Key Energy-Saving Technologies for Air Conditioner Operation Based on Xiaomi AI Large Model" (No. 2024BAB045).)

参考文献

[1] 中国家用电器协会. 中国房间空气调节器产业技术路线

- 图(2024)[R]. 北京:中国家用电器协会,2024-11-15. (China Household Electrical Appliances Association. Technology Roadmap for China room air conditioner industry (2024)[R]. Beijing: China Household Electrical Appliances Association, 2024-11-15.)
- [2] GB 50736—2012 民用建筑供暖通风与空气调节设计规范[S].
- [3] 王婷, 吴信宇, 李亚平, 等. 基于负荷预测的多联机变蒸发温度节能控制[J]. 家电科技, 2022(增刊1): 212-217. (Wang Ting, Wu Xinyu, Li Yaping, et al. Load-prediction based variable evaporating temperature control strategy of variable refrigerant volume system[J]. Journal of Appliance Science & Technology, 2022(S1): 212-217.)
- [4] Cao Haomin, Zhuang Dawei, Ding Guoliang, et al. Cooperative control strategy of variable evaporation temperature and variable superheat degree for a VRF system to improve temperature stability in multiple rooms [J]. International Journal of Refrigeration, 2025, 170: 1-18.
- [5] 吴颐达, 柴森春, 邓仕钧. 面向复杂场景的大型公共建筑需求冷负荷智能感知方法[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2026, 57(2): 872-880. (Wu Yida, Chai Senchun, Deng Shijun. Intelligent perception method for cooling load demand of large public buildings in complex scenarios[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2026, 57(2): 872-880.)
- [6] 林有彬, 夏宇栋, 金世斌, 等. 基于神经网络模型反演的变频空调系统过热度自适应控制方法[J]. 制冷技术, 2025, 45(5): 50-55. (Lin Youbin, Xia Yudong, Jin Shibin, et al. Adaptive control method for superheat of variable frequency air conditioning system based on neural network model inversion[J]. Chinese Journal of Refrigeration Technology, 2025, 45(5): 50-55.)
- [7] 张浩, 曹昊敏, 黄志刚, 等. 变蒸发温度的多联机节能控制策略[J]. 制冷技术, 2021, 41(5): 1-7. (Zhang Hao, Cao Haomin, Huang Zhigang, et al. Variable evaporating temperature control strategy in variable refrigerant flow system for cooling energy savings [J]. Chinese Journal of Refrigeration Technology, 2021, 41(5): 1-7.)
- [8] 王红梅. 基于负荷不确定性量化分析空调冷源系统节能优化研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2022. (Wang Hongmei. Research on energy-saving optimization of air conditioning cold source system based on quantitative analysis of load uncertainty[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2022.)
- [9] 王琦. 基于负荷不确定性分析的空调制冷系统优化[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2021. (Wang Qi. Optimization of air conditioning refrigeration system based on load uncertainty analysis [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2021.)
- [10] 李赞欣. 基于冷回收的双蒸发温度温湿度独立控制空调系统性能研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2023. (Li Zanzin. Performance research on temperature and humidity independent control air conditioning system with dual evaporation temperature based on cold recovery [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2023.)
- [11] 方忠诚, 黄沈杰, 鱼剑琳, 等. 电子膨胀阀的分段式变增益PID控制研究——以环境试验箱为案例[J]. 制冷学报, 2022, 43(6): 33-40. (Fang Zhongcheng, Huang Shenjie, Yu Jianlin, et al. Research on segmented variable gain PID control of EEV—taking environmental test chambers as an example [J]. Journal of Refrigeration, 2022, 43(6): 33-40.)
- [12] 郭斌, 辛电波, 贾晓晗, 等. 多联式空调(热泵)机组气液分离器满液原因及解决方案[J]. 制冷与空调(北京), 2025, 25(7): 46-51. (Guo Bin, Xin Dianbo, Jia Xiaohan, et al. Causes and solutions for full liquid of accumulator of multi-connected air-condition (heat pump) unit [J]. Refrigeration and Air-Conditioning, 2025, 25(7): 46-51.)
- [13] 肖寒松, 张国辉, 石文星, 等. 多联机控制技术进展与展望[J]. 制冷与空调(北京), 2019, 19(11): 69-79. (Xiao Hansong, Zhang Guohui, Shi Wenxing, et al. Progress and prospects of the control technology for multi-split air conditioner[J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2019, 19(11): 69-79.)
- [14] 司春强, 邵双全. 多联式空调制冷工况动态特性仿真研究[J]. 低温与超导, 2019, 47(9): 56-61. (Si Chunqiang, Shao Shuangquan. Simulation of dynamic behavior of variable refrigerant flow system in cooling mode [J]. Cryogenics & Superconductivity, 2019, 47(9): 56-61.)
- [15] 万夏红, 李荣杰, 张瑞昌. 工业空调电子膨胀阀过热度研究[J]. 制冷, 2025, 44(4): 92-96. (Wan Xiaohong, Li Rongjie, Zhang Ruichang. Study on superheat degree of electronic expansion valve for the industrial air conditioner [J]. Refrigeration, 2025, 44(4): 92-96.)

通信作者简介

李倍宇, 男, 中级工程师, 小米科技(武汉)有限公司, 18777357765, E-mail: libeiyu@xiaomi.com。研究方向: 家用空调智能控制, 空气源热泵空调节能运行研究。

About the corresponding author

Li Beiyu, male, intermediate engineer, Xiaomi Technology (Wuhan) Co., Ltd., 86-18777357765, E-mail: libeiyu@xiaomi.com. Research fields: intelligent control of household air conditioners, energy-saving research on air source heat pump air conditioner operation.