

文章编号:0253-4339(XXXX)XX-0001-09
doi: 10.12465/issn.0253-4339.20250301002

房间空调器性能动态测量虚拟建筑关键参数研究

高玉平^{1,2} 温程宇³ 石文星³ 韩星² 成建宏⁴ 蔡宁⁵ 汪超⁶ 杨子旭⁷

(1 华中科技大学能源与动力工程学院 武汉 430074; 2 广东美的制冷设备有限公司 佛山 528311;
3 清华大学建筑技术科学系 北京 100084; 4 中国标准化研究院 北京 100191; 5 中家院(北京)检测认证有限公司
北京 100176; 6 北京中家智锐智能装备科技有限公司 北京 100037; 7 北京科技大学能源与环境学院 北京 100083)

摘要 鉴于实验室稳态工况测量无法充分反映空调器的真实性能问题,基于虚拟建筑的房间空调器动态性能测量已成为当前的研究热点。通过模拟仿真和模型分析方法,确定了房间空调器性能动态测量关键参数:建筑的负荷点、0负荷点、热冷比、显热比、选型系数和房间有效热容和湿容,并通过实验验证了动态性能测量方法的可行性。结果显示:适用于我国平均建筑的房间空调器的选型系数制冷季可取1.33,对于安装2.4 kW空调的房间(12~20 m²),房间有效热容为240~300 kJ/K,湿容为50~100 kg,基于上述参数在实验室对3.5 kW空调器性能进行动态测试,发现动态能效较稳态能效下降31.8%,能更真实地反映空调器的真实性能。

关键词 空调器;虚拟建筑;动态测试;关键参数

中图分类号:TB657.2;TU831.4

文献标识码:A

Research on Key Parameters of a Building-Load Model for Dynamic Performance Measurement of Air Conditioner

Gao Yuping^{1,2} Wen Chengyu³ Shi Wenxing³ Han Xing² Cheng Jianhong⁴
Cai Ning⁵ Wang Chao⁶ Yang Zixu⁷

(1. School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, 430074, China; 2. Guangdong Midea Refrigeration Equipment Co., Ltd., Foshan, 528311, China; 3. Department of Building Technology Science, Tsinghua University, Beijing, 100084, China; 4. China National Institute of Standardization, Beijing, 100191, China; 5. China Home Appliance Testing Institute (Beijing) Co., Ltd., Beijing, 100176, China; 6. Beijing Zhongjia Zhirui Intelligent Equipment Technology Co., Ltd., Beijing, 100037, China; 7. School of Energy and Environment, University of Science and Technology Beijing, Beijing, 100083, China)

Abstract Given that measurements made under steady-state laboratory conditions cannot fully reflect the actual performance of air conditioners, the dynamic measurement of room air conditioner performance based on virtual buildings has become a research hotspot. This study determines the key parameters for the dynamic measurement of room air conditioner performance via simulation and model analysis methods, focusing on the load-point of the building, the zero-load point, the heat-to-cold ratio, the sensible-heat ratio, the selection coefficient, and the room's effective heat capacity and moisture capacity. The feasibility of this dynamic performance-measurement method is experimentally verified. The results show that for air conditioners applicable to average buildings in China, the selection coefficient for the cooling season was 1.33. For rooms with an installation capacity of a 2.4 kW air conditioner (rooms of 12–20 m²), the effective heat capacity was 240–300 kJ/K and the moisture capacity 50–100 kg. Based on these parameters, a dynamic performance test of a 3.5 kW air conditioner was conducted in the laboratory. These parameters resulted in a dynamic energy efficiency 31.8% lower than the steady-state-based energy efficiency, thus more accurately reflecting the actual performance of the air conditioner.

Keywords air conditioner; virtual building; dynamic testing; key parameters

随着我国房间空调器(2019年)、多联式空调(热泵)机组(2022年)、单元式空调机(2023年)等产品能

效标准的更新,近年来,空调产品的能效不断提高,有力推动了空调产品的技术进步。空调器的性能评

基金项目:国家自然科学基金(52408115)资助项目。(The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52408115).)

收稿日期:2025-03-01;修回日期:2025-03-24;录用日期:2025-04-24

价指标主要包括基于实验室测量的单一名义工况性能指标,即制冷能效比 EER(energy efficiency ratio)和制热性能系数 COP(coefficient of performance)和季节性能指标,即制冷季节能效比 SEER(seasonal energy efficiency ratio)、制热季节能效比 HSPF(heating seasonal performance factor)和全年性能系数 APF(annual performance factor)^[1],其季节性能指标评价以期能够反映空调器在制冷、制热季节以及全年内的全工况运行性能。

为了测量空调器在实际使用过程中的运行能耗,清华大学^[2]、太平洋瓦电公司^[3]、美国能源部^[4]、日本名古屋大学^[5]等单位提出了多种非介入、无干扰测量的空调器实际性能测量方法,并应用于空调器的现场性能测量中。实测数据表明,空调器实际运行的 SEER 和 HSPF 分别为 2.76~3.82 和 2.29~2.82 kW·h/(kW·h)^[6],无法达到 GB 21455—2019 的三级能效水平。同时由于控制算法的不同,空调器可能会在高频与低频之间波动运行,难以维持室温稳定^[7]。这表明,单纯依赖实验室稳态测量结果的空调器评价指标与安装后的测量结果存在较大偏差,难以充分反映其真实性能表现,且不能反映空调器对室内环境的调控品质。

空调器的真实运行性能与基于焓差实验室稳态测量数据计算的绩效存在差异的主要原因在于:1)被动环境与主动营造的区别:实验工况稳态均一,空调器被动运行,而实际运行时是主动营造室内环境,负荷动态、环境变化,建筑存在热惰性等;2)固定模式与动态控制不同:实验室空调器根据预先设定的压缩机和风机频率进行测试,无法反映变频设备的调控特征和调控品质,而实际运行面对不同的环境条件,空调器会有不同的效果和动态控制策略;3)季节性能测试工况与真实使用过程的差异:季节性能评价通过几个测量的稳态工况性能代表空调器的实际性能,采用抽象的建筑负荷、运行时间分布和空调器性能模型,与真实运行工况存在不同;此外,实际运行过程中,房间存在湿负荷,而稳态测试通常认为显热比为 1。差异如表 1 所示。

因此,研究能够尽可能反映真实运行状态且测量结果复现性强的空调器性能实验室测量方法尤其重要,重点是提炼实际使用特征,并构建实验室中模拟测试反映实际运行特征的性能测量方法。为此,国际上出现了基于负荷的房间空调器性能动态测量方法,包括控制方法验证程序(VRF-CVP)^[8]、静态投入法^[9]和虚拟建筑法^[10]。

支撑空调器性能动态测量方法的核心是要确定

表 1 动态测试和稳态测试差异

Tab.1 The differences between dynamic testing and steady-state testing

不同方面	性能动态测试	稳态性能测试
环境营造	主动营造	被动维持
运行模式	变频调控	固定频率
与真实使用差异	贴近实际	仅测试稳态工况点,未考虑动态调控过程

安装空调器适用房间的冷(热)负荷、湿负荷、热冷比、0 负荷点、负荷点、动态测试中的有效热容和湿容,以及匹配建筑的空调器容量选型系数、显热比等关键参数,利用这些参数控制房间负荷的投入情况,才能反映空调器在实际房间中的运行特征。然而,现在没有针对中国建筑特征进行研究的成果。为建立适用于中国建筑的空调器性能动态测量方法,则必须研究中国的建筑特征,据此,本文通过全年负荷模拟与现场实验相结合的方案,探讨适用于中国建筑的空调器性能动态测量关键参数,为空调器性能动态测量实验室建设和性能评价提供数据支撑。

1 基本原理

1.1 性能动态测量基本原理

空调器性能动态测量的基本原理是,在实验室的一定测量时段内,用室外侧模拟空调设备运行的室外工况,而在室内侧投入与室外工况相对应的热、湿负荷,用空调器作为室内环境调控设备,将室内温、湿度控制在规定的工况和精度范围内,并测量空调器在测量时段内的运行性能。目前,针对投入补偿负荷的差异,主要有有静态负荷法和虚拟建筑法 2 种方法。其中,静态负荷法是在对应测试工况下,室内侧补偿装置以恒定的速率向室内添加或移除热量,以模拟室内侧的负荷;由于静态负荷法补偿负荷是固定投入的,而房间温度响应速率受到实验室本身热容的影响,不同实验室可重复性差,因此通过模拟建筑对被测空调设备提供条件的响应、来施加补偿负荷^[11-12]的虚拟建筑法被认为是在实验室对空调器性能进行动态测量的有效方法。

无论是传统焓差室稳态测试,还是面向真实复杂工况测量方法,均包括 3 个必要的技术因素:1)典型建筑的冷、热负荷分布(即 $L(t_i)$);2)空调器制冷与制热运行时间分布(即 $n(t_i)$);3)空调器性能模型(即 $E(t_i)$)。根据以上几个关键技术因素结合季节性能比计算公式便可获得制冷季节性能系数,如式(1)所示。其中,虚拟建筑负荷模型是面向真实动态工况

测试的最基本要素,在性能动态测量中,包括虚拟建筑稳态负荷模型以及动态更新公式中的参数设定。本文将对虚拟建筑负荷模型的关键参数进行详细研究。

$$S = \frac{C_L}{C_E} = \frac{\sum L_c(t_i) n_i}{\sum \frac{L_c(t_i)}{E(t_i)} n_i} \quad (1)$$

式中: S 为季节能效比(即SEER); C_L 为制冷季节总负荷(即CSTL, cooling seasonal total load), $W \cdot h$; C_E (即CSTE, cooling seasonal total energy)为制冷季节总耗电, $W \cdot h$; $L_c(t_i)$ 为制冷季节对应外温下的冷负荷, W ; n_i 为对应外温下的运行时间, h ; $E(t_i)$ 为制冷季节对应外温 t_i 下相应的能效比(即EER); t_i 为外温, $^{\circ}C$ 。

1.2 建筑负荷模型描述方法

采用DeST^[13]以某住宅为例,对不同地区、不同墙体结构、人员密度、通风换气次数下建筑负荷特征进行模拟(具体参数设置参见文献[14]),考虑的变化因素包括换气次数(0.5~3.0 h⁻¹)、内热源(高/中/低)。图1所示为以南京地区为例的制冷、制热负荷情况,其基本特征是,采用间歇运行的模式制冷、制热负荷与室外温度线性关系并不显著,但也不存在指数和多项式关系;负荷最大值也并不发生在室外温度最高、最低的情况。在文献[14]中,验证了室外温度和负荷呈线性关系的单节点模型描述方法有利于空调器性能动态测量的快速性,这也与目前标准的建筑负荷线性模型一致。

传统建筑负荷线中,名义工况下的房间负荷与空调设备容量保持一致,以制冷季节为例,35 $^{\circ}C$ 下建筑负荷线即为设备设计容量。然而,模拟结果表明,间歇运行建筑负荷峰值远超稳态运行的平均值。若按稳态负荷选取空调器,则会导致启动时间过长。

因此,引入选型系数SR(sizing factor),即名义工况下的设备容量与建筑负荷线在名义工况下的容量的倍数关系,可以描述实际运行工况下空调器启动模式下制冷(热)量与稳态阶段制冷(热)量的差异。因此,采用线性的建筑负荷线结合选型系数来描述间歇运行空调器更加合理。此外,之前的研究一直忽视了潜热负荷的影响,因此应定义不同外温下空调器处理的潜热负荷。综上所述,虚拟建筑稳态负荷模型可以被表征为式(2)~(4)。

$$L_{c,s}(T_i) = \frac{1}{R} \frac{H\phi_{inl,c}(T_{nc})}{T_{nc} - T_{c,0}} (T_i - T_{c,0}) \quad (2)$$

$$L_{c,l}(T_i) = L_{c,s}(T_j) \left(\frac{1}{H} - 1 \right) \quad (3)$$

$$L_h(T_j) = \frac{C_{HCR} L_c(T_{nc})}{T_{nh} - T_{h,0}} (T_j - T_{h,0}) \quad (4)$$

式中: R 为选型系数(即SR); $L_{c,s}(T_i)$ 和 $L_{c,l}(T_i)$ 为制冷模式虚拟建筑模型对应外温下的显热和潜热负荷, W ; T_i 为相应的室外温度, $^{\circ}C$; $T_{c,0}$ 和 T_{nc} 为0负荷点和负荷点对应的室外温度, $^{\circ}C$; H 为显热比(即SHR, sensible heat ratio); $L_h(T_j)$ 为制热模式虚拟建筑模型对应外温下的负荷, W ; $T_{h,0}$ 和 T_{nh} 为制热0负荷点和负荷点, $^{\circ}C$; C_{HCR} 为热冷比(即HCR, heating and cooling ratio)。

需要根据当前建筑负荷与空调器制冷(热)量获得室内工况机的设定,即根据动态更新公式获得下一时间温湿度设定,其温度和湿度对应的公式分别为式(5)和式(6)。

$$T_{RAT}(t + \Delta t) = T_{RAT}(t) + \frac{\Delta t [L(T_j) - Q_a(t)]}{C_z} \quad (5)$$

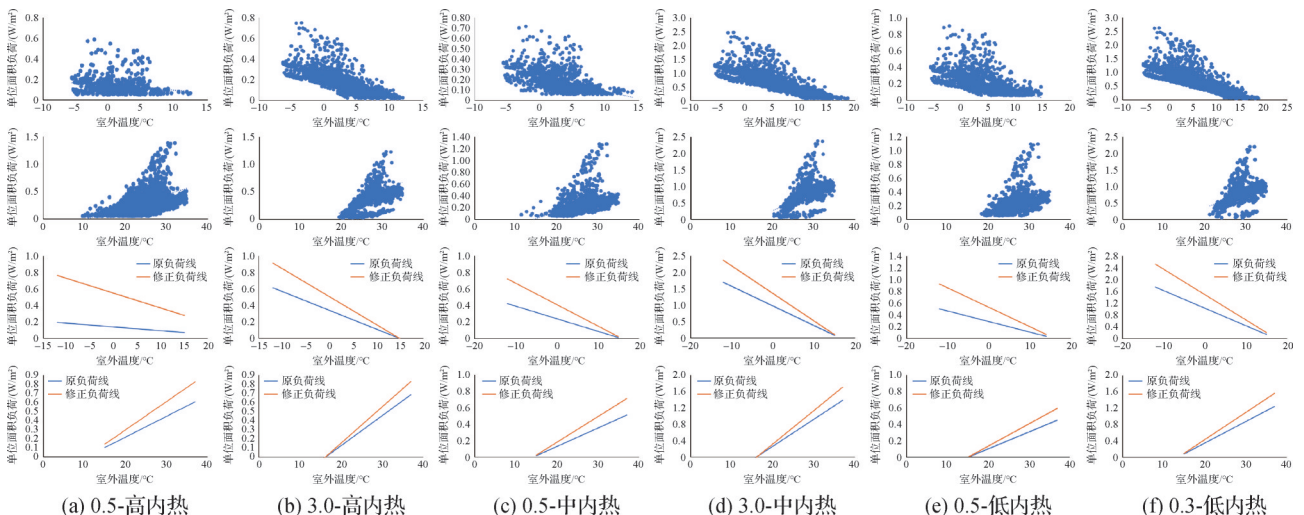


图1 建筑负荷模拟与建筑负荷线的结果

Fig.1 The results of the simulation of building load and the building load line

$$\omega(t + \Delta t) = \omega(t) + \frac{\Delta t \left[L(T_j) \left(\frac{1}{H} - 1 \right) - Q_i(t) \right]}{h_{fg} C_w} \quad (6)$$

式中： $T_{\text{RAT}}(t+\Delta t)$ 和 $T_{\text{RAT}}(t)$ 分别为下一时刻和此刻室内的设定温度， $^{\circ}\text{C}$ ； $Q_a(t)$ 为此刻被测空调器的制冷量， W ； $\omega(t+\Delta t)$ 和 $\omega(t)$ 分别为下一时刻和此刻室内的设定含湿量， g/kg (干空气)； h_{fg} 为水蒸气汽化潜热， J/kg ； C_z 和 C_w 分别为虚拟房间的热容(J/K)和湿容(kg)。

2 关键参数

在上述虚拟建筑稳态负荷模型以及动态更新公式(式(2)~(6))中,虚拟建筑的关键参数未知,对于稳态负荷模型包括0负荷点、负荷点、选型系数、显热比、热冷比;对于动态更新公式,则主要包括热容和湿容参数。下面对上述关键参数的确定方法分别进行研究。

2.1 建筑负荷线关键参数

1)0负荷点和负荷点。

建筑负荷线的0负荷点和负荷点分别定义为:建筑冷、热负荷为0时及其对应的室外平均温度,以及建筑设计工况对应的室外平均温度以及制冷、制热负荷。对于居住建筑所用的空调器,图2给出了制冷、制热季节不同参数设置下的起始温度。考虑节能性要求,制冷起始温度尽量取上限值,考虑到与现行标准GB/T 7725—2022的一致性以及节能要求,以 22°C 为自然室温平衡点,制冷0负荷点设置为 23°C 。对于制热季节,确定以 13°C 为自然室温平衡点,考虑供暖安全性的要求,制热0负荷点可取 15°C 。建筑负荷点可参照之前的设置,制冷工况取统一的 35°C ,而制热工况根据室外气候特征,名义工况分别为 $7^{\circ}\text{C}/6^{\circ}\text{C}$ 、 $-2^{\circ}\text{C}/-3^{\circ}\text{C}$ 、 $-12^{\circ}\text{C}/-13.5^{\circ}\text{C}$ 和 -25°C ^[15]。对于空调器和低环境温度热风机,其名义工况分别为 $-2^{\circ}\text{C}/-3^{\circ}\text{C}$ 和 $-12^{\circ}\text{C}/-13.5^{\circ}\text{C}$ 。

2)选型系数。

采用室外温度和负荷的线性关系结合选型系数表征建筑负荷特征,既保证房间空调器满足额定能力标称要求,又用贴近用户实际使用的运行负荷评价动态测试能力功率。因此,选型系数的取值尤为重要。负荷计算结果表明,满足间歇运行负荷比满足稳态阶段负荷的选型容量提升21%~38%,满足间歇运行负荷比满足稳态阶段负荷的选型容量提升39%~50%。因此,根据建筑负荷模拟结果,可以获得不同地区的选型系数。制冷和制热工况均存在选型系数,在制热工况能力足够时,以制冷准;当制冷能力足够时,以制热选型系数为准。制冷工况可以统

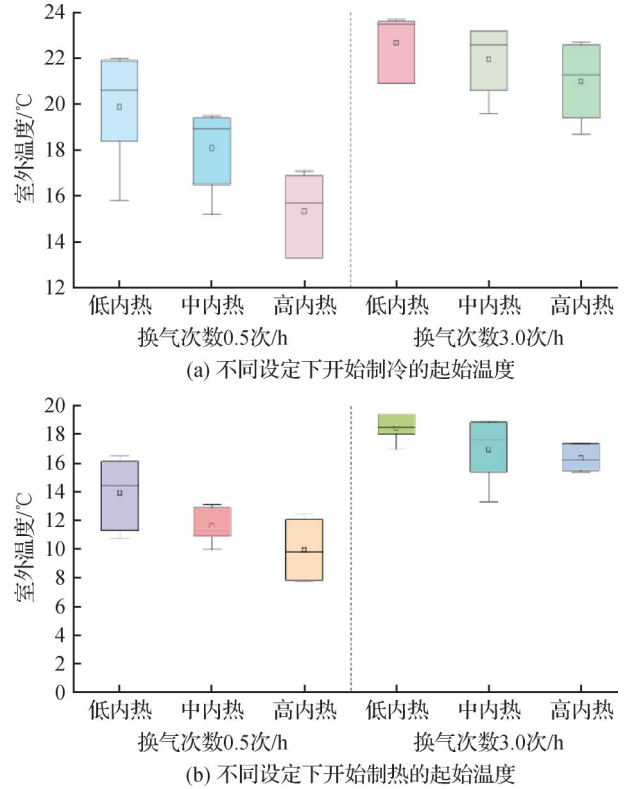


图2 制冷季节与制热季节的起始温度

Fig.2 The starting temperatures of the cooling season and the heating season

一为1.33。

3)建筑冷热比。

热冷比(HCR)是制热负荷/量与制冷负荷/量的比值,之前通常被定义为外温 35°C 建筑制冷负荷下与 0°C 下的建筑制热负荷之比。在最新的定义中,制热工况下负荷点不再采用 0°C ,而采用名义工况分别对应 $7^{\circ}\text{C}/6^{\circ}\text{C}$ 、 $-2^{\circ}\text{C}/-3^{\circ}\text{C}$ 、 $-12^{\circ}\text{C}/-13.5^{\circ}\text{C}$ 和 -25°C 的负荷点。以夏热冬冷地区南京为例,典型房间的热冷比取值为1.10(-2°C 的制热量与 35°C 下的制冷量)。

4)显热比。

显热比(SHR)是制冷季节显热负荷占总冷负荷的比重。由于不同地区室外气候特征不同,建筑内除湿需求也不同。湿润地区的显热比往往低于干燥地区。根据模拟结果,各典型城市的显热比如图3所示。结果表明:湿润地区显热比在0.35~0.55,半湿润地区显热比在0.50~0.60,干旱地区显热比在0.70~1.00,干旱地区显热比在1.00。根据空调器的运行特征及建筑显热比的要求,本研究取统一的0.60~0.80。

2.2 热容、湿容参数

1)热容参数。

影响室内温度变化的热容当是室内的有效热容

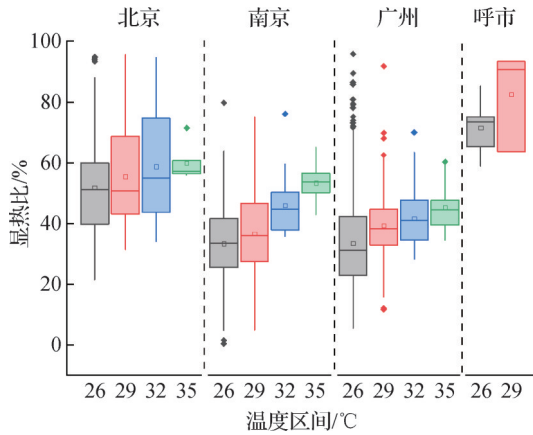


图3 各典型城市显热比

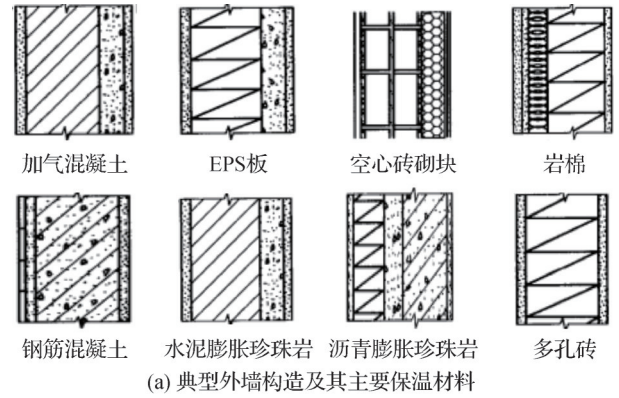
Fig.3 Specific heat ratio of each typical city

(包含室内空气、墙体内表面,以及家具等室内物品的热容)。以文献调研和现场实测的方法确定建筑有效热容。一般认为,墙体用于室内有效热容是墙体整体热容的5%~20%^[16]。《实用供热空调设计手册》^[17]中给出了多种常见墙体。应用的材料和墙壁的种类众多,但上述墙体特征都可以被总结成为“水泥砂浆+建筑材料”的形式,如图4(a)所示,包括加气混凝土、EPS板、空心砖砌块、岩棉、钢筋混凝土墙、水泥膨胀珍珠岩、沥青膨胀珍珠岩、多孔砖等。以3 m×4 m×3 m(长×宽×高)、一面外墙的房间为例,以5%、10%和20%的有效热容范围,分别计算有效热容的范围分别为113~650、126~540和150~1 148 kJ/K,如图4(b)所示。研究表明,若以空调器的响应时长30 s进行计算分析,影响墙体的厚度应不足5%,因此墙体的热容仅约为113~150 kJ/K,考虑到家具等热容,应在200~300 kJ/K。

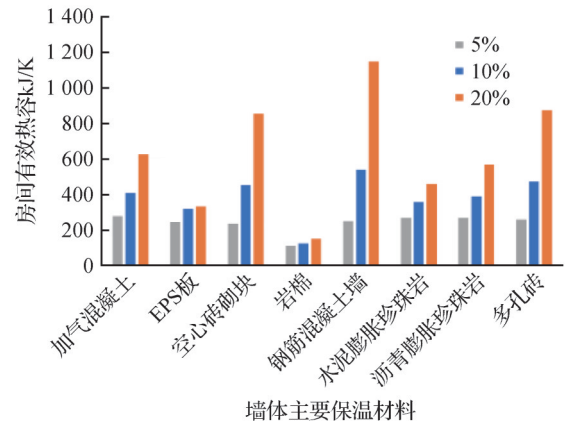
通过现场实测可获得房间的有效热容,分别测量广东、河北以及江苏的6处民居。暖风机以一定功率向房间内投入热量,其中一部分以对流形式直接进入空气;另一部分以辐射形式传到家具以及围护结构表面。由于墙体内表面以及家具蓄热量难以在现场实测中获得,故在实验边界条件下,采用差分法逐时计算墙壁蓄热。由于墙壁蓄热计算存在误差,在蓄热量较小的时间段内计算房间热容,能够有效降低误差带来的影响。将5~10 min时间段内的30 s瞬时热容的滑动平均值作为房间的有效热容值。实测结果表明:不同房间折合的有效热容(折算为2.4 kW房间)约为240~300 kJ/K。

2) 湿容参数。

湿容测试方法与热容类似,向房间中投入一定湿量,并用实时监测加湿器中水的质量变化,同时测试空气含湿量的平均增值。用投入湿量除以空气含



(a) 典型外墙构造及其主要保温材料



(b) 水泥砂浆+建筑材料的有效热容

图4 外墙构造及参考文献中的有效热容计算

Fig.4 Calculation of effective thermal capacity in exterior wall construction and references

湿量增值即得到房间湿容。在不考虑房间换气、家具吸湿的理想情况下,湿容应等于房间内空气质量。图5所示为测试的典型房间湿容值。服务10 m²房间2.4 kW湿容测试结果为50~100 kg。

2.3 启动工况设定

相比于CSA等提出的测试方法,研究还提出了应当考察机组启动升降温过程的能力和能效,应对启动过程的能效比进行监测。通过模拟结果得到室外干球温度与初始自然室温之间的关系,如图6所示。

3 应用测量结果

3.1 测量流程

根据上述虚拟建筑负荷模型和动态更新公式,结合空调器运行小时数和性能模型,可以构建空调器制冷季节动态能源消耗效率DSEER(dynamic seasonal energy efficiency ratio)、制热季节动态能源消耗效率DHSPF(dynamic heating seasonal performance factor)、全年动态能源消耗效率DAPF(dynamic annual performance factor)实验与计算方法。以制冷季节为例,构建的负荷线如图7所示,并根据前面已

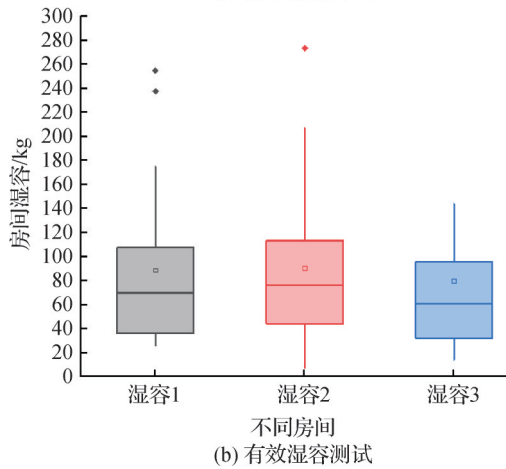
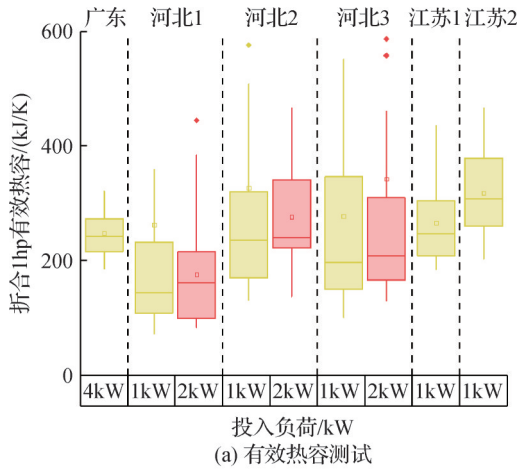


图5 有效热容和湿容的实际测试

Fig.5 Measurement of effective heat capacity and effective moisture capacity

有研究,获得建筑负荷线如式(7)所示。而虚拟建筑的动态更新公式中热容和湿容值分别按式(8)和式(9)取值,由于虚拟房间的热容与空调器服务房间面

表2 制冷季节的测试工况

Tab.2 Test conditions during the cooling season

房间负荷率	设备负荷率/%	SHR/%	室内侧初始工况		室内侧目标工况		室外侧工况	
			干球温度/°C	湿球温度/°C	干球温度/°C	湿球温度/°C	干球温度/°C	湿球温度/°C
额定	100	130	28	24	27	19	35	
A	76.9	100	32	28	27	19	35	
B	44.8	58.3	30	26	27	19	30	
C	25.6	33.3	28	24	27	19	27	

测试的基本步骤参照图8,基本流程为:1)每组试验开始前,按表1的制冷工况调节室外干/湿球温度、室内初始参数,允差满足要求;工况稳定后,根据虚拟建筑模型结果,与空气焓差实验室开启数据交互和同步;2)实时测量并记录空调能力、功率、室内干/湿球温度、除湿量等参数;3)虚拟建筑模型每10s获取实验室测量的空调能力、室内干球、湿球温度和

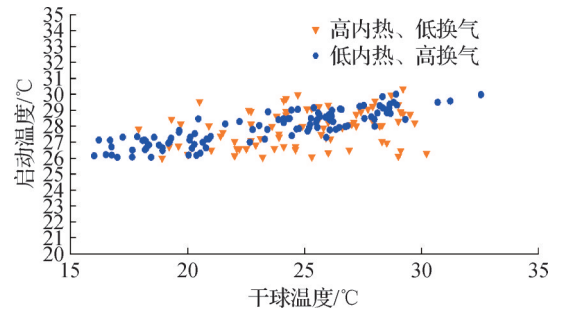


图6 南京市空调启动自然室温

Fig.6 Natural room temperature when air conditioners are turned on in Nanjing

积直接相关,故式中的 $Q_{c,n}$ 为空调器名义制冷量(kW),对应2.4kW机组,虚拟房间的热容、湿容分别为287kJ/kg和50kg。

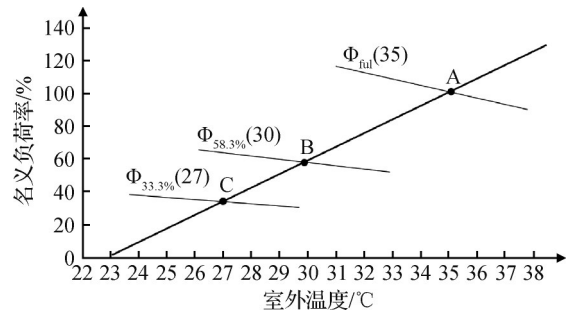


图7 制冷季节的建筑负荷线

Fig.7 Building load curve during the cooling season

$$L_{c,s}(T_i) = \frac{1}{1.33} \frac{H\varphi_{ful,c}(35)}{35 - 23} (T_i - 23) \quad (7)$$

$$C_z = Q_{c,n}/8.0 \quad (8)$$

$$C_w = Q_{c,n}/50 \quad (9)$$

除湿量,并计算下一时刻的室内干球和湿球温度目标值,传递给室内侧工况机;4)室内侧工况机收到给出的目标值后开始调节室内干球和湿球温度,并在下一时刻将室内实际干球温度和湿球温度调整到目标值;5)每组实验时长为4h,若实验开始的3、1.5、1h(分别对应A、B、C工况)内,室内干球温度在连续30min内均低于27°C,则判定空调进入维持温度阶

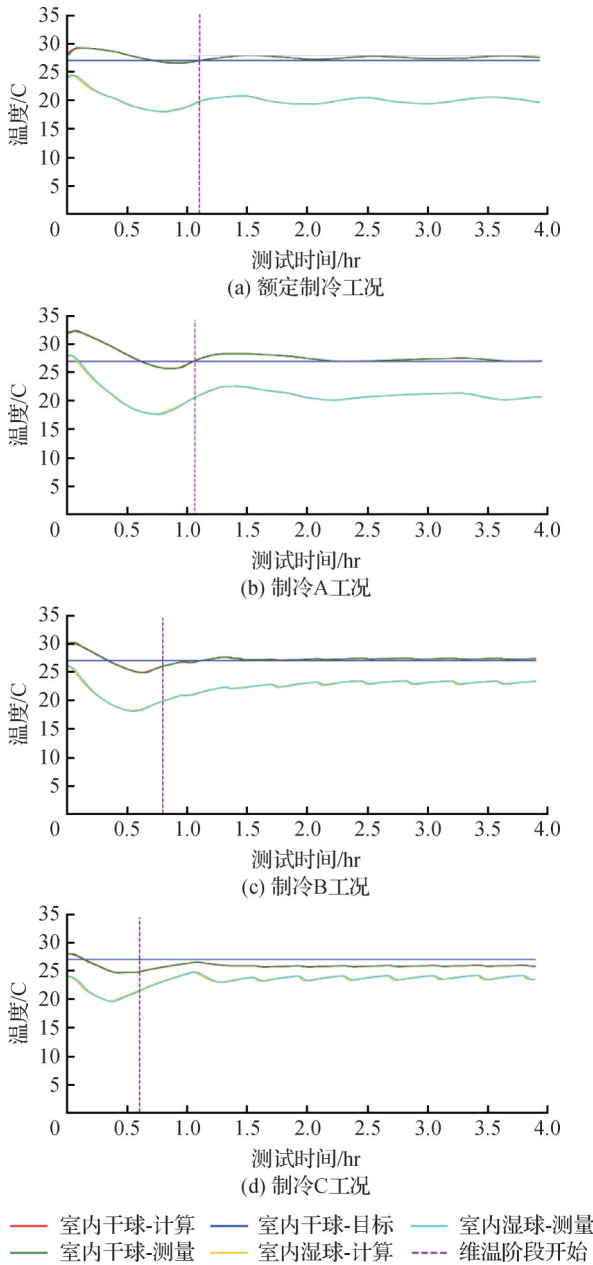


图9 制冷季节测试工况温度变化

Fig.9 Temperature variation of the test conditions during the cooling season

度。不确定度计算结果如表4所示。

4 结论

本文通过通过模拟仿真和模型分析方法,研究了房间空调器性能动态测量的关键参数,得到如下结论:

1)虚拟建筑模型包括稳态负荷模型和动态更新公式,采用线性的建筑负荷线结合选型系数,可以更为合理地描述间歇运行空调器房间的负荷特征,且可以在同一实验室进行多种空调器的测量。

2)明确了建筑负荷点、0负荷点、热冷比、显热

表3 制冷季各工况供冷功率和能效比

Tab.3 Refrigeration season supply cooling power and energy efficiency ratio under various operating conditions

工况	阶段	供冷功率/W	能效比/(W/W)	动态能效比/(W/W)
额定制冷工况	启动阶段	3 582	3.9	4.25
	维温阶段	3 427	4.3	
制冷A工况	启动阶段	3 164	4.4	5.01
	维温阶段	2 546	5.1	
制冷B工况	启动阶段	2 456	5.3	8.01
	维温阶段	1 405	8.4	
制冷C工况	启动阶段	1 800	8.1	10.11
	维温阶段	1 118	10.4	

表4 不确定度计算结果

Tab.4 Uncertainty calculation result

合成不确定度	数值	百分比/%
$U_c(Q)$	47.8	1.4
$U_c(P)$	15.9	2.2
$U_c(E)$	0.121	2.9

比、选型系数,其中选型系数制冷季可取 1.33;基于文献调研和实地测量,给出了房间的热容和湿容参数取值,2.4 kW 空调房间热容为 287 kJ/K,湿容约为 50 kg。

3)采用性能动态测量方法对 3.5 kW 空调器进行测试,发现空调器均可在规定时间内调控达温、实验室温度跟随性良好。实验测试动态能效比较稳态能效比下降 31.8%,更加真实地反映了空调的实际能效,使得该方法具有可行性。

参考文献

[1] 房间空气调节器能效限定值及能效等级:GB 21455—2019[S]. 北京:中国标准出版社,2020.(Minimum allowable values of the energy efficiency and energy efficiency grades for room air conditioners: GB 21455—2019[S]. Beijing: Standards Press of China, 2020.)

[2] YANG Zixu, DING Lianrui, XIAO Hansong, et al. All-condition measuring methods for field performance of room air conditioner[J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 180: 115887.

[3] CONANT A, PROCTOR J. Field tests of specially selected air conditioners for hot dry climates[C]//American Council for an Energy Efficient Economy. Pacific Grove, 2008.

[4] Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, Department of Energy. Energy conservation program: test

- procedures for central air conditioners and heat pumps [EB/OL]. (2022-10-25) [2025-01-15]. <https://www.federalregister.gov/documents/2022/10/25/2022-22257/energy-conservation-program-test-procedure-for-central-air-conditioners-and-heat-pumps>.
- [5] WATANABE C, OHASHI E I, HIROTA M, et al. Evaluation of annual performance of multi-type air-conditioners for buildings [J]. *Journal of Thermal Science and Technology*, 2009, 4(4): 483-493.
- [6] YANG Zixu, DING Lianrui, XIAO Hansong, et al. Field performance of household room air conditioners in Yangtze River Region in China: case studies [J]. *Journal of Building Engineering*, 2021, 34: 101952.
- [7] 杜萍, 陈远远, 刘壬生. 变频空调常用频率控制技术的仿真研究 [J]. *家电科技*, 2019(1): 42-44, 47. (DU Ping, CHEN Yuanyuan, LIU Rensheng. Simulation research on frequently used frequency control technology of inverter air conditioner [J]. *Journal of Appliance Science & Technology*, 2019(1): 42-44, 47.)
- [8] AHRI 1230-2021 performance rating of variable refrigerant flow (VRF) multi-split air-conditioning and heat pump equipment [S]. Arlington: Air-Conditioning, Heating, and Refrigeration Institute, 2021.
- [9] The Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM). Proposal for the revision of the harmonized test standard EN 14825, for the testing and rating of air conditioners and heat pumps at part load conditions and calculation of seasonal performance [R]. Berlin: BAM, 2019.
- [10] CSA SPE07: 23 Load-based and climate-specific testing and rating procedures for heat pumps and air conditioners [S]. Toronto: CSA Group, 2023.
- [11] CHENG L, DHILLON P, HORTON W T, et al. Automated laboratory load-based testing and performance rating of residential cooling equipment [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2021, 123: 124-137.
- [12] CHENG L, PATIL A, DHILLON P, et al. Impact of virtual building model and thermostat installation on performance and dynamics of variable-speed equipment during load-based tests [C]//*International Refrigeration and Air Conditioning Conference*. West Lafayette, Purdue University, 2018.
- [13] 燕达, 谢晓娜, 宋芳婷, 等. 建筑环境设计模拟分析软件 DeST 第一讲 建筑模拟技术与 DeST 发展简介 [J]. *暖通空调*, 2004, 34(7): 48-56. (YAN Da, XIE Xiaona, SONG Fangting, et al. Building environment design simulation software DeST(1): an overview of developments and information of building simulation and DeST [J]. *Journal of HV & AC*, 2004, 34(7): 48-56.)
- [14] 杨子旭, 高玉平, 周宇珏, 等. 空调器动态性能测量用建筑负荷特征研究 [J]. *家电科技*, 2024(增刊1): 74-79. (YANG Zixu, GAO Yuping, ZHOU Yujue, et al. Study on building load characteristics for dynamic performance measurement of air conditioner [J]. *Journal of Appliance Science & Technology*, 2024 (Suppl. 1): 74-79.)
- [15] 石文星, 杨子旭, 王宝龙. 对我国空气源热泵室外名义工况分区的思考 [J]. *制冷学报*, 2019, 40(5): 1-12. (SHI Wenxing, YANG Zixu, WANG Baolong. Division of outdoor nominal condition of air source heat pumps in China [J]. *Journal of Refrigeration*, 2019, 40(5): 1-12.)
- [16] ANTONOPOULOS K A, KORONAKI E P. On the dynamic thermal behaviour of indoor spaces [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2001, 21(9): 929-940.
- [17] 陆耀庆. 实用供热空调设计手册 [M]. 2版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008. (LU Yaoqing. *Practical heating and air conditioning design manual* [M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008.)
- [18] YANG Zixu, DING Lianrui, XIAO Hansong, et al. Field performance of household room air conditioners in Yangtze River Region in China: case studies [J]. *Journal of Building Engineering*, 2021, 34: 101952.
- [19] 曹小林, 李雄林, 喻首贤, 等. 空调器性能测试平台测量不确定度的研究 [J]. *制冷学报*, 2009, 30(5): 58-62. (CAO Xiaolin, LI Xionglin, YU Shouxian, et al. Investigation on measurement uncertainty in air conditioner performance-testing bench [J]. *Journal of Refrigeration*, 2009, 30(5): 58-62.)
- [20] 戴世龙, 王敏, 齐淑芳, 等. 房间空调器空气焓值法测量不确定度简化计算研究 [J]. *制冷学报*, 2010, 31(6): 51-55. (DAI Shilong, WANG Min, QI Shufang, et al. Simplified calculation of uncertainty in room air-conditioner measurement with air enthalpy test method [J]. *Journal of Refrigeration*, 2010, 31(6): 51-55.)

通信作者简介

杨子旭,男,副教授,北京科技大学能源与环境工程学院,15862178772,Email: yangzx@ustb.edu.cn。研究方向:制冷与热泵节能技术。

About the corresponding author

Yang Zixu, male, associate professor, School of Energy and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, 86-15862178772, E-mail: yangzx@ustb.edu.cn. Research fields: refrigeration and heat pump energy-saving technology.