

文章编号:0253-4339(XXXX)XX-0001-10

doi: 10.12465/issn.0253-4339.20250718001

房间空调器动态能效标准进展与对比分析

王龙炎¹ 曹昊敏¹ 丁国良¹ 丁屹² 成建宏³

(1 上海交通大学机械与动力工程学院 上海 200240; 2 上海交通大学自动化与感知学院 上海 200240;

3 中国标准化研究院 北京 100191)

摘要 基于负荷的动态能效测试已成为房间空调器行业公认的下一代性能评价方法,相关标准的制定包括动态能效测试和动态能效计算2部分内容,但现有研究在上述2部分的具体实施上存在多种方法。本文通过对国内外相关研究进行总结和对比,为中国的空调器动态能效标准制订提供技术建议。对于动态能效测试方法,推荐采用虚拟建筑负荷法测试方案,测试工况按照额定负荷、中间负荷和最小负荷3个负荷率进行设置,室内温度按照热容和湿容的单节点模型更新;对于动态能效计算方法,全年能效系数可按照负荷插值和能效插值的方法进行计算,负荷模型选择线性简化模型,运行时间模型按照全年发生时间统计。在国内的动态能效标准制订中,热容、湿容和发生时间等关键参数需要根据国内情况进行确定。动态能效标准未来工作的重点在于提升测试的可重复性,同时包括利用大数据分析确定室外温度发生时间,针对我国气候区域进行分区,以及引入碳排放评价指标。

关键词 房间空调器;动态测试;能效标准;建筑负荷模型

中图分类号: TB657. 2; TM925. 12

文献标识码: A

Recent Progress and Comparative Analysis of Dynamic Energy Efficiency Standards for Room Air Conditioners

Wang Longyan¹ Cao Haomin¹ Ding Guoliang¹ Ding Yi² Cheng Jianhong³

(1. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, 200240, China; 2. School of Automation and Intelligent Sensing, Shanghai, 200240, China; 3. Chinese National Institute of Standardization, Beijing, 100191, China)

Abstract Load-based dynamic energy efficiency testing is recognized as a next-generation performance evaluation method in the room air conditioner industry. The related standards contain two parts: dynamic energy efficiency testing and dynamic energy efficiency calculation. However, various approaches exist for implementing these in current research. This study aimed to provide technical suggestions for the formulation of dynamic energy efficiency standards for air conditioners in China by summarizing and comparing the results of relevant domestic and international research. The virtual building load method was adopted for the dynamic energy efficiency testing method, and three load rates were used: the rated load, an intermediate load, and the minimum load. The indoor temperature was updated using a single-node model of the heat and moisture capacitance values. To determine the dynamic energy efficiency, the dynamic annual performance factor could be calculated by interpolating the load and energy efficiency. A simplified linear model was used for the load, and the model of the operating time was based on the time statistics for annual operation. Some key parameters (e. g., the heat capacitance, moisture capacitance, and outdoor temperature bin distribution) still need to be determined based on domestic conditions. Future work could focus on improving the repeatability and could include the use of big data analysis to determine the outdoor temperature bin distribution, zoning based on climate regions, and the introduction of carbon emission evaluation metrics.

Keywords room air conditioner; dynamic testing; energy-efficiency standard; building-load model

房间空调器(简称:空调器)作为现代建筑中普及率高、运行时间长的关键电器设备,已成为建筑能耗的主要终端之一^[1]。提升空调器的运行能效对实现全球“碳达峰”与“碳中和”目标至关重要,因此,建立科学合理的房间空调器能效评价方法具有显著

意义^[2]。

国内房间空调器的能效评价体系不断完善,相关评价方法已从COP(性能系数,coefficient of performance)或EER(能效比,energy efficiency ratio)的单工况性能,逐步发展为SEER(制冷季节能源消

耗效率, seasonal energy efficiency ratio)、HSPF(制热季节能源消耗效率, heating seasonal performance factor)、APF(全年能源消耗效率, annual performance factor)等多工况加权的综合评价^[3]。然而,现行的能效测试方法均是对空调器的稳态性能进行测试,在测试过程中,压缩机频率、风机转速等控制参数均被设置为固定值;但在实际运行中,上述控制参数会依据空调器内置的控制策略,随室内负荷变化而动态调整^[4-5]。稳态测试方法未能考虑控制策略对空调器性能的影响,难以准确反映空调器在实际运行条件下的真实能耗水平。现场性能测试结果表明,空调器实际运行能效与基于稳态测试的标称值普遍存在20%以上的偏差,使用稳态能效评价指标可能会误导空调器的设计方向^[6-7]。

为解决空调器稳态能效测试与实际运行状态偏离较大的问题,一些研究提出了基于负荷的动态能效测试方法。该测试方法的核心思路是使被测空调器对负荷进行响应,主动调节控制参数运行,最终使房间温度达到并维持在设定值^[8]。动态能效已是国内外公认的下一代空调性能评价方法,我国也已启动相关研究和标准制定工作^[9-10]。

当前国内外动态能效标准的制订中,存在不同的技术路线。对于测试方案,德国^[11-12]采用静态投入负荷法,而加拿大^[13]、ISO^[14]则采用虚拟建筑负荷法;对于负荷模型,日本^[15]采用理论负荷模型,而加拿大^[13]、ISO^[14]则采用简化线性负荷模型;各标准在室内温度更新方法中热容和湿容参数的确定,测试工况选取和最终能效计算方面也都不完全相同。

我国在制定具有国际协调性、先进性与可实施性的动态能效标准时,需要对现有方案进行评估。本文旨在梳理现有动态能效研究成果,分析现有动态能效标准(或草案)的合理性与不足之处,为我国房间空调器动态能效标准的修订、完善及验证工作提供科学依据。

1 动态能效研究概述

1.1 动态能效测试的基本流程

动态能效测试的基本流程如图1所示,与现有的稳态APF测试类似,动态能效测试整体分为实验测试和能效计算两大部分。

在动态测试过程中,空调器按照内置的控制策略运行,同时测试装置按照负荷模型向室内侧施加负荷。室内温度在空调器制冷/热量和负荷的影响下不断更新,并影响下一时刻空调器的性能,如此不断循环直至该工况测试完成进入下一工况。

完成所有工况测试后,进行动态能效值 DAPF (dynamic annual performance factor) 的计算。动态能效值根据各个测试工况的空调器性能、负荷模型和发生时间模型按照一定的插值方法计算得到。

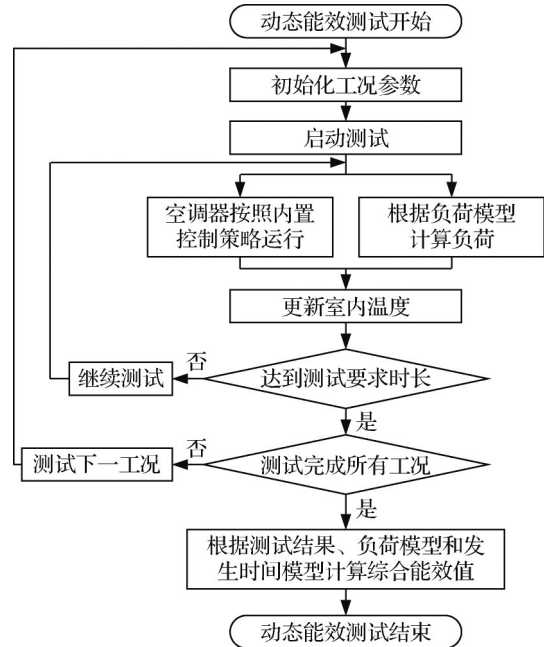


图1 动态能效测试基本流程

Fig.1 Basic process of dynamic energy efficiency test

1.2 国内外研究进展

1.2.1 国外研究进展

国外开展空调器动态能效研究的国家和机构,包括加拿大、美国、日本、德国及ISO等。

2015年,加拿大标准协会CSA成立专项委员会,旨在制定更能体现变频热泵实际安装性能的测试与评级规程^[16]。经过数年委员会研讨和实验室初期验证后^[17],初版标准草案EXP-07:19于2019年3月发布^[18]。在征求意见并修订后,正式版本标准SPE-07:23《Load-based and climate-specific testing and rating procedures for heat pumps and air conditioners》于2023年2月发布^[13]。

2019年,德国联邦材料研究与测试研究所BAM (Bundesanstalt für Materialforschung und-prüfung) 于针对EN 14825提出了基于负荷补偿的测试方法提案《Proposal for the revision of the harmonised test standard EN 14825:2016》^[19],随后在2020年9月发布了针对空调器和热泵的负载补偿测试指南《Test guideline for load-based performance testing and calculation of the seasonal performance (Air conditioners)》^[11]和《Test guideline for load-based performance testing and calculation of the seasonal

performance (Heat pumps)》^[12]。

2021年,美国在多联机的测试标准中引入控制方法验证程序(controls verification procedure, CVP)的内容,并于2024年将CVP加入针对房间空调器的标准 AHRI Standard 210/240-2024《Performance rating of unitary air-conditioning and air-source heat pump equipment》^[20]中。需要说明的是,CVP的目的在于检验控制策略有效性,而非测定空调器能效值;能效值测定仍基于稳态测试方法。

2021年,ISO成立了“Next generation of performance standards”TG13工作组,负责收集基于负荷测试方法相关的信息^[21];并于2025年1月发布了ISO/CD 21280《Testing and rating including seasonal performance of air-to-air air-conditioners and heat pumps considering the effect of native control》标准的初版草案^[13]。

2022年,日本早稻田大学研究团队对基于负荷的测试方法进行验证^[4],并对可重复性进行研究^[22],为标准的可行性提供了实验依据。

1.2.2 国内研究进展

国内在空调器动态标准方面也开展了相关的研究。格力制定了动态测试的企业标准^[23],清华大学

杨子旭等提出了动态测试的负荷模型^[7],中国标准化研究院和中国家电研究院也正在组织对GB 21455空调器能效标准进行修订。

格力参与了加拿大CSA EXP-07:19标准的制定过程,为标准中动态负载测试方法提供了实验数据和技术支持^[24];并于2024年1月公布了针对房间空调器动态能效测试的企业标准Q/GD 2000290—2024《动态运行高效节能房间空气调节器》^[23]。

清华大学杨子旭等在动态能效测试的建筑负荷模型参数确定方面进行研究^[25-26],通过现场调研和实验室测试等方法,按照中国气候和建筑结构,提出了对应的建筑负荷模型^[7]。

中国标准化研究院、中国家电研究院等机构以及头部空调企业也已着手推进新版房间空调器动态能效标准的制定,目前国内的动态能效标准也正在不断完善和修订中^[27]。

1.3 现有研究成果对比

现阶段国内外的相关研究成果总结如表1所示。对于动态能效测试方法和动态能效计算方法中的各个要素的对比,分别在第2章和第3章进行论述。

表1 动态能效测试研究成果和技术路径对比

Tab.1 Comparison of research findings and technical approaches on load-based testing

时间	单位	成果	动态能效测试方法			动态能效计算方法		
			测试方案	测试工况	室内温度更新方法	能效计算方法	负荷模型	运行时间模型
2019	德国BAM	Test guideline for a load-based performance testing 测试指南 ^[11-12]	投入静态负荷法	改变室外温度调节负荷率		负荷插值、能效插值	简化线性模型	全年发生时间
2022	日本早稻田大学Giannetti等	实验验证了虚拟建筑负荷法的可行性和重复性 ^[15,22]	虚拟建筑负荷法		热容和湿容单节点模型		理论负荷模型	
2023	加拿大CSA	CSA SPE-07:23标准 ^[13]	虚拟建筑负荷法	改变室外温度调节负荷率	热容和湿容单节点模型	负荷插值、能效插值	简化线性模型	全年发生时间
2024	格力	Q/GD 2000290—2024企业标准 ^[23]	虚拟建筑负荷法	改变室外温度调节负荷率	热容和湿容单节点模型	负荷插值、能效插值	理论负荷模型	全年发生时间
2025	ISO	ISO/CD 21280标准草案 ^[14]	虚拟建筑负荷法	改变室外温度调节负荷率	热容和湿容单节点模型	负荷插值、能效插值	简化线性模型	全年发生时间
2025	清华大学杨子旭等	负荷模型、实验验证等 ^[7,25-26]	虚拟建筑负荷法	/	热容和湿容单节点模型		简化线性模型	

2 动态能效测试方法

2.1 测试方案

现有的动态能效测试方案分为投入静态负荷法和虚拟建筑负荷2类^[26]。投入静态负荷法由德国BAM^[11]提出,通常在房间量热计实验室中实施,其测

试原理如图2(a)所示,通过室内侧的风机盘管或电加热装置等辅助设备,直接向室内侧移除或增加热量,以物理施加的方法模拟空调器工作时的冷/热负荷。但室内侧温度不仅受到空调器制冷/热量和投入负荷影响,还与实验室本身结构的热容特性相关;由于不同实验室的热容特性存在固有差异,投入静态

负荷法在不同实验室间的测试结果可重复性难以保证^[7]。

为了克服投入静态负荷法在可重复性方面的局限性,虚拟建筑负荷法被提出并得到了广泛应用。例如,CSA SPE-07:23 标准^[13]、ISO/CD 21280 标准草案^[14]和 Q/GD 2000290—2024 企业标准^[23]均采用了该方法。虚拟建筑负荷法通常在空气焓差实验室中实施,其测试原理如图 2(b)所示,通过模拟建筑物对被测空调器的响应来施加负荷,并通过动态更新室内侧的干湿球温度,间接反映建筑负荷对空调器的影响。采用虚拟建筑负荷法时,不同实验室可基于相同的典型建筑参数进行负荷模拟计算,从而提升实验室间的测试可重复性。

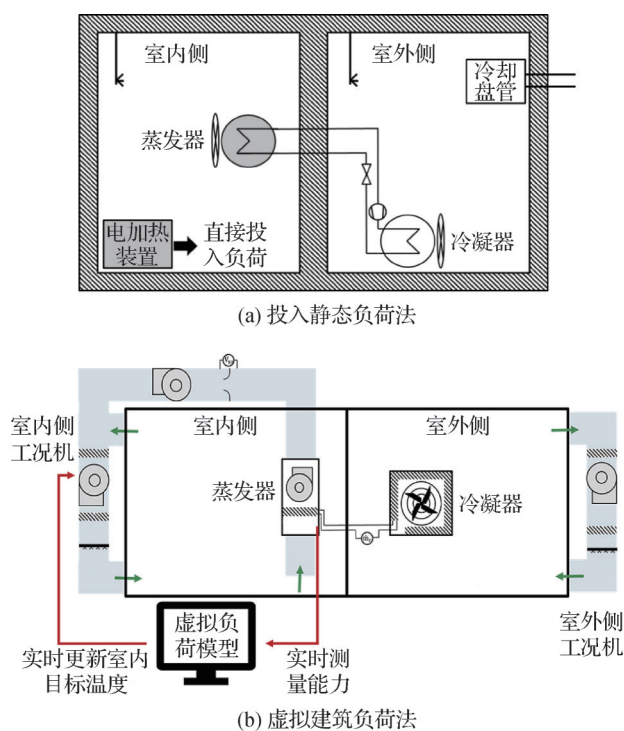


图 2 动态能效测试方案^[8,11]

Fig.2 Dynamic energy efficiency test method

基于上述分析,虚拟建筑负荷法具有更好的可重复性,应作为我国动态能效标准中的测试方案。此外,目前大多数国内厂商和检测机构实验室为空气焓差实验室^[28],采用虚拟建筑负荷法也有利于减少实验室改造成本和推进标准的实施。

2.2 测试工况

动态测试工况的负荷区间应覆盖空调器日常运行的主要负荷范围。区别于稳态测试通过改变压缩机频率来调节负荷率,动态测试采用改变室外温度的方法来实现负荷率的变化。现有研究中制冷与制热的测试工况分别如表 2 和表 3 所示,制冷测试工况

的室外温度普遍选取在 25~35 °C;制热测试工况则普遍选取在-7~12 °C。

表 2 制冷测试工况对比

Tab.2 Comparison of cooling test conditions

研究	室外干球温度/°C	室内干球温度/°C	室内湿球温度/°C
BAM Test Guideline ^[11]	35/30/25/20	27	19
CSA SPE-07:23 标准 ^[13]	40/35/30/25	23.3	17.2
Q/GD 2000290—2024 企业标准 ^[23]	35/29	27	19
ISO/CD 21280 标准草案 ^[14]	35/27	27	19
清华大学高玉平等 ^[7]	35/30/27	27	19

表 3 制热测试工况对比

Tab.3 Comparison of heating test conditions

研究	室外干球(湿球)温度/°C	室内干球温度/°C
BAM Test Guideline ^[12]	-7(-8)/2(1)/7(6)/12(11)	20
CSA SPE-07:23 标准 ^[13]	-15(-15.5)/-8.3(-9.4)/1.1(-0.4)/8.3(5.2)/12.2(7.5)	23.3
Q/GD 2000290—2024 企业标准 ^[23]	2(1)/7(6)	20
ISO/CD 21280 标准草案 ^[14]	0(-1)/7(6)	20

对于国内动态能效测试工况点的设置,可考虑沿用 GB 21455—2019 中的工况设置方法,在制冷和制热模式下均设置额定负荷、中间负荷和最小负荷 3 个工况点。具体对于制冷工况,室外温度设定为 35、30、27 °C;对于制热工况,室外温度设定为-2、2、7 °C。该方案既能覆盖空调器的常用负荷区间,也能与现有其他研究的室外温度范围相对应。

2.3 室内温度更新方法

目前动态能效研究中室内温度均采用单节点模型进行更新,即将整个房间作为一个整体进行建模。该方法响应速度快,能够在合理时间尺度内达到收敛,且计算和实现简单^[25,29]。

在制冷工况下的室内侧干球温度和含湿量守恒关系分别如式(1)和式(2)所示。

$$C_s \frac{dT_{ID}}{dt} = L_{c,s} - \dot{Q}_{c,s} \quad (1)$$

$$C_w h_{fg} \frac{dw}{dt} = L_{c,1} - \dot{Q}_{c,1} \quad (2)$$

式中: T_{ID} 为室内的干球温度,°C; w 为含湿量,kg/kg(干空气); t 为时间,s; C_s 为房间热容,J/K; C_w 为房间湿容,kg; h_{fg} 为水的汽化潜热,J/kg; $L_{c,s}$ 、 $L_{c,1}$ 分别为制冷时

虚拟显热负荷和潜热负荷, W ; $\dot{Q}_{c,s}$ 、 $\dot{Q}_{c,l}$ 分别为被测空调器的制冷量中的显热和潜热部分, W 。

对式(1)和式(2)按照 Δt 的时间间隔进行差分, 制冷工况下一时刻的室内干球温度和含湿量可以分别按照式(3)和式(4)进行计算。

$$T_{id}(t + \Delta t) = T_{id}(t) + \frac{\Delta t [L_{c,s}(T_j) - \dot{Q}_{c,s}]}{C_s} \quad (3)$$

$$w(t + \Delta t) = w(t) + \frac{\Delta t [L_{c,l}(T_j) - \dot{Q}_{c,l}]}{C_w h_{fg}} \quad (4)$$

式中: T_j 为室外的干球温度, $^{\circ}C$ 。

在制热工况下制热量全部为显热, 因此只对室内侧的干球温度进行更新, 如式(5)所示。

$$T_{id}(t + \Delta t) = T_{id}(t) - \frac{\Delta t [L_h(T_j) - \dot{Q}_h]}{C_s} \quad (5)$$

式中: L_h 为制热时的虚拟负荷, W 。

目前各研究中室内温度更新方法的差异在于热容和湿容的取值。理论上, 热容应等于室内空气、墙体表面, 以及家具等室内物品的热容; 湿容应等于房间内空气质量(不考虑房间换气、家具吸湿过程)。热容和湿容都与房间的面积或体积等结构参数相关, 通常认为房间面积与空调器的制冷量成正比关系, 因此大部分研究都将热容和湿容表示为额定制冷量比值的形式, 如表4所示。目前各研究中这些比值差距较大, 在制定国内标准时, 热容和湿容的具体数值需基于国内建筑结构进行验证和确定。

表4 热容和湿容参数值对比

Tab.4 Comparison of heat capacitance and moisture capacitance

研究	热容/(J/K)	湿容/kg
日本早稻田大学 Giannetti 等 ^[15]	10倍房间空气热容	未明确
CSA SPE-07:23 标准 ^[13]	$\dot{Q}_c(35) \times 216$	$\dot{Q}_c(35) \div 38.7$
Q/GD 2000290—2024 企业标准 ^[23]	热容折算系数 \times 房间空气热容	房间内空气质量
ISO/CD 21280 标准草案 ^[14]	$\dot{Q}_c(35) \times 180$	待定
清华大学杨子旭等 ^[25]	$Q_c(35) \times 125$	$Q_c(35) \div 50$

注: $\dot{Q}_c(35)$ 表示空调器的额定制冷量, W 。

3 动态能效计算方法

3.1 计算方法

全年动态能效值可沿用 GB 21455—2019^[30] 中稳态 APF 的计算方法, 由制冷季节和制热季节的总制冷量和制热量除以总耗电量计算得到, 如式(6)

所示。

$$E_{DAPF} = \frac{C_L + H_L}{C_E + H_E} \quad (6)$$

式中: E_{DAPF} 表示空调器的全年动态能源消耗效率; C_L 、 H_L 分别为空调器制冷季节动态制冷量负荷和制热季节的动态制热量负荷, $kW \cdot h$; C_E 、 H_E 分别为空调器制冷季节和制热季节的动态耗电量, $kW \cdot h$ 。

目前已有的动态能效研究中空调器的季节制/热量和季节耗电量均分别采用负荷插值和能效插值的计算方法^[7,12,14,23]。以制冷季节为例, 制冷季节的总制冷量需求和总耗电量分别由插值得到负荷和耗电量乘以对应室外温度下的运行时间计算, 分别如式(7)和式(8)所示。其中, 空调器的动态能效值由第2节动态能效实验测试得到, 负荷模型和运行时间模型还需要确定。

$$C_L = \sum L_c(T_j) \times n(T_j) \quad (7)$$

$$C_E = \sum \frac{L_c(T_j)}{E(T_j)} \times n(T_j) \quad (8)$$

式中: $E(T_j)$ 为室外温度为 T_j 时的周期能效; $n(T_j)$ 为室外温度为 T_j 时的发生时间, h 。

3.2 负荷模型

现有的动态能效研究中的负荷模型分为理论负荷模型和简化线性模型2类。理论负荷模型基于影响建筑热平衡的各个因素建立, 以 Q/GD 2000290—2024 企业标准^[23] 为例, 建筑负荷综合考虑外温差导热、外界空气渗透热、太阳辐射热、内部设备及人体产热等因素计算得到, 制冷和制热工况下的负荷分别如式(9)和式(10)所示, 其中各组成部分再通过详细公式进一步计算。

$$L_c = \dot{Q}_{cond} + \dot{Q}_{inf} + \dot{Q}_{sol} + \dot{Q}_{int} \quad (9)$$

$$L_h = \dot{Q}_{cond} + \dot{Q}_{inf} - \dot{Q}_{sol} - \dot{Q}_{int} \quad (10)$$

式中: \dot{Q}_{cond} 、 \dot{Q}_{inf} 、 \dot{Q}_{sol} 和 \dot{Q}_{int} 分别为外温差导热、外界空气渗透热、太阳辐射热和内部设备及人体产热, W 。

简化线性模型则认为负荷与室外侧温度呈现线性变化的关系, 典型的研究包括 CSA SPE-07:23 标准^[13]、ISO/CD 21280 标准草案^[14] 和清华大学杨子旭等^[25]。简化线性模型中, 建筑负荷通过对设计负荷点和零负荷点的负荷进行线性插值计算得到, 如式(11)所示。

$$L = \frac{1}{S} \times \frac{\dot{Q}_{design}}{T_{OD, design} - T_{zl}} \times (T_j - T_{zl}) \quad (11)$$

式中: S 为选型系数; $T_{OD, design}$ 、 T_{zl} 、 T_j 分别为负荷点室外温度、零负荷点室外温度和当前工况的室外温度, $^{\circ}C$; \dot{Q}_{design} 为空调器的在负荷点室外温度时的制冷量或者

制热量, kW。

在制冷时, 空调器需要同时降温和除湿, 因此总建筑负荷被分为显热负荷和潜热负荷2部分。显热负荷 $L_{e,s}$ 和潜热负荷 $L_{e,l}$ 按照显热比 R_s 进行划分, 如式(12)和式(13)所示。在制热工况时, 室内机不涉及析湿过程, 空调器的制热量全部用于室内侧干球温度的升高, 因此建筑负荷被认为全部是显热负荷, 即 $R_s=1$ 。

$$L_{e,s} = R_s \times L_e \quad (12)$$

$$L_{e,l} = (1 - R_s) \times L_e \quad (13)$$

为评估不同负荷模型适用性, 以额定制冷量为 3.5 kW 的典型空调器为例, 对比了不同模型在制冷和制热工况下的负荷计算结果, 如图所示。由图3可知, 理论负荷模型计算得到的负荷随室外温度也呈现线性变化的规律, 但在计算过程上明显复杂; 因此将负荷简化为线性是合理的, 同时具有计算方便和简洁的优势。简化线性模型中, 不同研究的差异在于选型系数和零负荷点室外温度的确定, 各负荷模型的系数值对比如表5所示。其中, 清华大学杨子旭等^[25]提出的模型负荷范围设置能够覆盖空调器的常用运行范围; 制冷工况的零负荷点室外温度为 23 °C, 与现行标准 GB 21455—2019《房间空气调节器能效限定值及能效等级》^[30] 和 GB 7725—2022《房间空气调节器》^[31] 能够对应一致; 且制热工况的零负荷点室外温度为 15 °C, 也与现行标准中的 17 °C 接近。

基于上述分析, 采用简化线性模型在保证合理性的同时更加简洁, 可以考虑作为我国动态能效标准中的负荷模型。现有简化线性模型中, 清华大学杨子旭等^[25]提出的模型零负荷点室外温度与现行标准有良好对应性且负荷范围合理, 可以作为标准中负荷模型参数设置的参考。

3.3 运行时间模型

现有动态能效计算中的空调运行时间模型普遍沿用稳态能效标准所使用的全年发生时间模型, 即统计一年中空调器在各个室外温度时的开机运行小

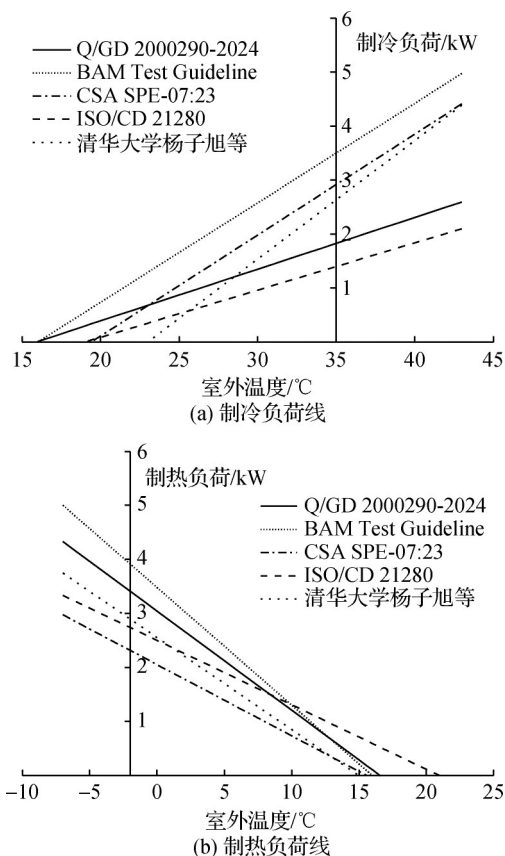


图3 负荷线对比

Fig.3 Comparison of load lines

时数。

不同标准中的发生时间对比如图4所示, 各标准中采用的发生时间呈现相同的变化趋势, 各曲线均存在一个峰值, 表示空调器最常使用的室外温度。但各标准中的发生时间均基于各自特定的气候类型进行统计, 因此在峰值对应的温度值以及全年总运行小时数方面表现出明显差异。国内动态能效标准中发生时间需要依据国内气候特点和用户使用习惯进行统计。

4 动态能效标准的发展趋势

第2章和第3章的总结分析表明, 现有的动态能效测试技术路线已初步成型, 但在测试可重复性、发

表5 线性负荷模型系数值对比

Tab.5 Comparison of parameters in load models

研究	制冷工况		制热工况	
	选型系数	零负荷点室外温度/°C	选型系数	零负荷点室外温度/°C
BAM Test Guideline ^[11]	1.0	16.0	1.0	16.0
CSA SPE-07:23 标准 ^[12]	1.2	19.4	1/1.15	15.6
ISO/CD 21280 标准草案 ^[14]	2.0	19.0	2.0	21.0
清华大学杨子旭等 ^[25]	1.33	23.0	1.1/1.33	15.0

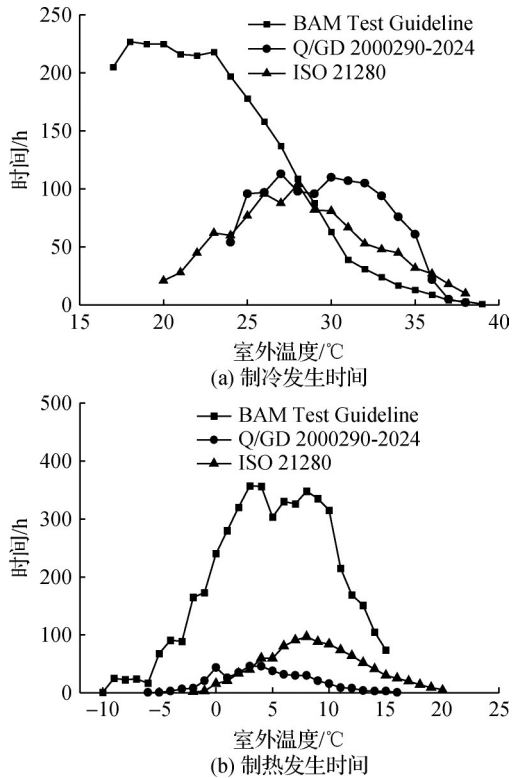


图4 发生时间对比

Fig.4 Comparison of outdoor temperature bin distribution

生时间更新、气候区域划分和评价指标方面仍需要完善。

4.1 提升测试的可重复性

作为空调器产品的强制性标准,动态能效测试方法的可重复性和可再现性是标准被采纳和实施最重要的前提,即需要保证同一台空调器在同一测试设备不同时间测试,或者在不同的测试设备上的测试结果一致。提高动态能效测试的可重复性是目前标准制定中最受关注的问题。

动态测试的可重复性受到多种因素的影响,例如焓差室的结构、仪器测量的延迟以及室内工况机对温湿度的调节跟踪性。采用虚拟建筑负荷法和相同的房间结构参数,有助于消除不同焓差室结构差异对测试重复性的影响;同时,建议在正式测试前对焓差室进行校准^[29]。在焓差室硬件改造方面,动态测试对干湿球温度的测量精度要求更高,且需要能够快速响应;在具体实现上,可以采用热电偶对干球温度进行测量^[32],采用冷镜式露点仪对湿球温度进行测量^[33]。在软件改造方面,室内温湿度在动态测试中需要实时调节,沿用稳态测试时的PID调节可能因存在较大延迟而无法达到测试允差;为了减小调节延迟,可以通过在室内工况机下一时刻干球温度控制信号中增加前馈补偿来实现^[34]。

4.2 利用大数据确定发生时间

发生时间是计算空调能效的关键参数,其与用户的使用习惯密切相关。目前现行国家标准 GB 21455—2019^[30]采用的发生时间沿用自 GB 21455—2013^[35]版本。然而,随着生活水平的提高,空调普及率大幅提高,全国居民平均每百户的空调拥有量已从2013年的70.4台增至2024年的150.6台^[36];用户的使用习惯也已发生显著变化(例如更频繁的使用、更长的运行时间),旧版标准中的数据已难以准确反映当前的实际使用情况,需要对室外温度发生时间进行更新。

物联网技术的成熟为发生时间的精准获取提供了解决方案。通过内置传感器和Wi-Fi连接,大量空调设备的实时运行状态和环境参数等数据可以上传至制造商的云端大数据平台^[37]。利用这些真实、连续且覆盖范围广的物联网数据进行统计分析,能够有效克服传统抽样问卷调查样本量有限、时效性差等固有缺陷,从而获取更全面精确且更具时效性的发生时间分布。基于大数据的发生时间确定方法已被国际标准采纳,如ISO/CD 21280动态能效标准草案^[14]引入了空调物联网统计发生时间数据;对于国内标准的修订,该方法同样是可行和可接受的。

4.3 划分气候区域

气候因素对空调器的运行能效、建筑的负荷特性,以及用户的空调器使用习惯均具有重要影响^[38-39]。目前国际上现行的稳态空调器能效评价标准,如ISO 16358、欧盟EN 14825:2022、美国AHRI Standard 210/240-2024、澳大利亚AS/NZS 3823和日本工业标准JISC 9621:2013等已经关注到气候分区对空调器能效的影响^[40];动态能效标准(或草案)、加拿大CSA SPE-07:23标准^[13]和ISO/CD 21280标准草案^[14]也考虑到了气候分区的影响。

我国气候南北方差异显著,总体上包括夏热冬暖、夏热冬冷、温和、寒冷以及严寒等气候区域。不同气候区域的温度差异显著,这种显著的温度差异直接影响建筑的冷热负荷特性、负荷发生时间以及设备的实际运行能效^[41-42]。我国现行的空调器能效GB 21455—2019中,给出的负荷线和发生时间基于全国典型城市平均数据获得,与不同地域的实际气候状况存在较大差异。在能效标准的制定中引入气候区域划分,可以针对不同地区有目标地研发相应产品,提升能效指标评价的准确性;然而,这也会增加企业产品研发的工作量,并加大产品销售的管理难度。

在GB 21455《房间空气调节器能效限定值及能效等级》标准修订时,可采取分阶段实施的方法。在近期的标准制定中,仍暂时针对某个特定城市或地域进行评价;随着技术的进步和市场细分化进程的推进,可保持统一的空调器动态性能测量方法,而建筑负荷模型和运行时间模型依据地域特点制定。同时,应推动各省市制定强制性地方能效标准,并使其逐步纳入国标中按气候分区细化的能效等级要求。由于不同气候区的制热方案存在较大差异,故建议优先从制热性能的气候分区要求入手,并逐步推广至不同气候区的制冷和除湿性能评价中。

4.4 引入碳排放评价指标

目前我国空调器能效评价体系仅聚焦于运行阶段的能耗表现,缺少对空调器全生命周期(包括原材料获取、生产、运输、使用及回收阶段)碳排放指标的量化评估,这种局限不利于引导制冷剂替代等关键低碳化行动的推进^[43-44]。例如,制冷量和能效等级相同的R32与R290空调器,R290空调器的全生命周期碳排放量仅约为R32的85%^[45];但现行的能效评价体系中两者的能效数值却完全相同。这表明仅关注运行能效的评价体系无法全面评估空调产品对碳减排的真实贡献,因此在动态能效标准修订中可以考虑引入反映空调器碳排放量的评价指标。

5 结论

动态能效相关标准的制定包括动态能效测试和动态能效计算2部分。目前相关研究在具体方法选择上仍存在多种不同技术路线,本文通过梳理和对比相关研究,为国内标准的制定提供了技术建议。

1)对于动态能效测试方法,测试方案可以选择可重复性更好的虚拟建筑负荷法;测试工况可以通过改变室外温度的方法进行设置,具体工况点可以设置为额定负荷、中间负荷和最小负荷3个负荷率;室内温度可以按照热容和湿容的单节点模型进行更新。

2)对于动态能效计算方法,全年能效系数可以通过对发生时间加权,按照负荷插值和能效插值的方法进行计算;负荷模型可以采用简单且合理的线性简化负荷模型;运行时间模型可采用全年发生时间模型。

3)动态能效标准的未来工作重点在于提升测试的可重复性,同时包括利用大数据确定室外温度发生时间,针对我国气候区域进行分区,以及引入碳排放评价指标等。

参考文献

- [1] Yang C, Seo S, Takata N, et al. The life cycle climate performance evaluation of low-GWP refrigerants for domestic heat pumps [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2021, 121: 33-42.
- [2] 陈炫丞, 庄大伟, 丁国良, 等. GB 21455—2019中低温中间制冷工况参数获取方法不唯一导致的APF值计算的问题分析[J]. *制冷学报*, 2023, 44(4): 127-132. (Chen Xuancheng, Zhuang Dawei, Ding Guoliang, et al. Analysis on APF calculation problem caused by the optional method to obtaining performance parameters of low-temperature intermediate refrigeration condition in GB 21455—2019[J]. *Journal of Refrigeration*, 2023, 44(4): 127-132.)
- [3] 杨洁, 陈彦如, 成建宏, 等. 中国-东盟房间空调器能效表征方法比对和发展趋势分析[J/OL]. *制冷学报*, 2025-02-07. <https://link.cnki.net/urlid/11.2182.TB.20250207.1257.002>. (Yang Jie, Chen Yanru, Cheng Jianhong, et al. Comparison and development trends of energy efficiency characterization methods for room air conditioners in China and ASEAN countries[J]. *Journal of Refrigeration*, 2025-02-07. <https://link.cnki.net/urlid/11.2182.TB.20250207.1257.002>.)
- [4] Dhillon P, Welch D, Butler B, et al. Validation of load based testing methodology for residential air conditioners and heat pumps [J]. *Energy and Buildings*, 2023, 299: 113607.
- [5] Dhillon P, Horton W T, Braun J E. Comparisons of load-based and AHRI 210/240 testing and rating for residential heat pumps [J]. *Science and Technology for the Built Environment*, 2023, 29(5): 473-490.
- [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] 高玉平, 温程宇, 石文星, 等. 房间空调器性能动态测量虚拟建筑关键参数研究[J/OL]. *制冷学报*, 2025-06-30. <https://link.cnki.net/urlid/11.2182.TB.20250627.1334.002>. (Gao Yuping, Wen Chengyu, Shi Wenxing, et al. Research on key parameters of building load model for dynamic performance measurement of air conditioner [J]. *Journal of Refrigeration*, 2025-06-30. <https://link.cnki.net/urlid/11.2182.TB.20250627.1334.002>.)
- [8] 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.
- [9] 杨子旭, 石文星, 王宝龙, 等. 空调热泵设备性能测量

- 与评价:从稳态到实际[J]. 家电科技, 2023(增刊1): 216–220. (Yang Zixu, Shi Wenxing, Wang Baolong, et al. Performance measurement and evaluation of air-conditioning heat pump equipment: from steady state to reality [J]. Journal of Appliance Science & Technology, 2023(S1): 216–220.)
- [10] 李亚飞, 连彩云, 王现林, 等. 房间空调器动态运行能效测试方法研究[J]. 制冷与空调(北京), 2025, 25(3): 87–94. (Li Yafei, Lian Caiyun, Wang Xianlin, et al. Study on dynamic energy efficiency test method for room air conditioner[J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2025, 25(3): 87–94.)
- [11] Test guideline for a load-based performance testing and calculation of the seasonal performance (air conditioners, cooling only)[S].
- [12] Test guideline for a load-based performance testing and calculation of the seasonal performance (heat pumps)[S].
- [13] CSA SPE-07: 23 Load-based and climate-specific testing and rating procedures for heat pumps and air conditioners[S].
- [14] ISO/CD 21280 Testing and rating including seasonal performance of air-to-air air-conditioners and heat pumps considering the effect of native control[S].
- [15] Giannetti N, Matsui S, Mori R, et al. Emulator-type load-based tests for dynamic performance characterization of air conditioners [J]. Energy and Buildings, 2022, 273: 112411.
- [16] Harley B, Alatorre M, Dymond C, et al. CSA EXP07: Ongoing progress, lessons learned, and future work in load-based testing of residential heat pumps [C]//19th International Refrigeration and Air Conditioning Conference, 2022: 2456.
- [17] EXP07: 19 Load-based and climate-specific testing and rating procedures for heat pumps and air conditioners Interim lab testing and rating results[R/OL]. 2020-07-07. <https://neea.org/resource/exp0719-load-based-and-climate-specific-testing-and-rating-procedures-for-heat-pumps-and-air-conditioners/>
- [18] CSA EXP-07: 19 Load-based and climate-specific testing and rating procedures for heat pumps and air conditioners[S].
- [19] 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]. 2019.
- [20] AHRI Standard 210/240-2024 Performance rating of unitary air-conditioning and air-source heat pump equipment[S].
- [21] ISO/TC 86/SC 6 – Testing and rating of air-conditioners and heat pumps [EB/OL]. (2021-05-10) [2025-07-08]. <https://www.iso.org/committee/50376.html>.
- [22] Dondini D, Giannetti N, Mizuno A, et al. Reproducibility assessment of an emulator-type load-based testing methodology [J]. International Journal of Refrigeration, 2024, 159: 39–49.
- [23] Q/GD 2000290—2024 动态运行高效节能房间空气调节器[S]. (Q/GD 2000290—(2024 Dynamic operation of high-efficiency energy-saving room air conditioner[S].)
- [24] Gree ultra heat technology accredited by NA [EB/OL]. (2019-06-21) [2025-07-08]. <https://global.gree.com/contents/118/675.html>.
- [25] 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(S1): 74–79.)
- [26] 杨子旭, 石文星, 王宝龙, 等. 基于动态环境及变负荷的改进空调设备季节性能测量方法探讨[J]. 家电科技, 2023(3): 74–78. (Yang Zixu, Shi Wenxing, Wang Baolong, et al. Dynamic environment and load-based seasonal performance testing procedures for air conditioning systems [J]. Journal of Appliance Science & Technology, 2023(3): 74–78.)
- [27] 张丽. 以标准引领发展 房间空调器性能测试新方法研讨会在九江召开[J]. 家用电器, 2024(9): 74–75. (Zhang Li. A seminar on the development of new methods for performance testing of room air conditioners guided by standards was held in Jiujiang [J]. Home Appliance, 2024(9): 74–75.)
- [28] Xia Y, Yang J. Research and implementation progress of energy efficiency standard and labeling for room air conditioners [R/OL]. 2024-11-07. <https://www.apec.org/docs/default-source/satellite/egeec/files/63/20241107-1620-cnis.pdf>.
- [29] Li Cheng. Laboratory load-based testing, performance mapping and rating of residential cooling equipment [D]. West Lafayette, IN, USA: Purdue University, 2020.
- [30] GB 21455—2019 房间空气调节器能效限定值及能效等级[S]. (GB 21455—2019 Minimum allowable values of the energy efficiency and energy efficiency grades for room air conditioners[S].)
- [31] GB 7725—2022 房间空气调节器[S]. (GB 7725—(2022 Room air conditioner[S].)
- [32] 夏玉娟, 杨双, 王现林, 等. 基于动态负荷的房间空调器能效测试方法验证[J/OL]. 暖通空调, 2025-06-03. <https://link.cnki.net/urlid/11.2832.tu.20250603.1054.002> (Xia Yujuan, Yang Shuang, Wang Xianlin, et al. Verification of energy efficiency testing method for room

- air conditioners based on dynamic load[J/OL]. *Journal of HV&AC*, 2025-06-03. <https://link.cnki.net/urlid/11.2832.tu.20250603.1054.002>
- [33] Dhillon P, Kim D, Horton W T, et al. Uncertainty quantification approach for dynamic load-based testing [C]// 20th International Refrigeration and Air Conditioning Conference, 2024: 2678.
- [34] Giannetti N, Sholahudin, Mizuno A, et al. Feed-forward compensation for emulator-type testing facilities [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2024, 167: 257-268.
- [35] GB 21455—2013 房间空气调节器能效限定值及能效等级[S]. (GB 21455—2013 Minimum allowable values of the energy efficiency and energy efficiency grades for room air conditioners[S].)
- [36] 中国统计年鉴 2024 [EB/OL]. (2024-10-15) [2025-07-07]. <https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01&zb=A0A0D&sj=2024>. (China statistical yearbook 2024 [EB/OL]. (2024-10-15) [2025-07-07]. <https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01&zb=A0A0D&sj=2024>.)
- [37] 徐振坤, 李金波, 石文星, 等. 长江流域住宅用空调器使用状态与能耗大数据分析[J]. *暖通空调*, 2018, 48(8): 1-8. (Xu Zhenkun, Li Jinbo, Shi Wenxing, et al. Big data analysis on usage state and energy consumption of residential air conditioners in the Yangtze River basin[J]. *Journal of HV&AC*, 2018, 48(8): 1-8, 89.)
- [38] 赵巍, 张华, 邬志敏. 气候条件及空调器的运行模式对变容量空调器季节能效比的影响[J]. *上海理工大学学报*, 2007, 29(4): 391-394. (Zhao Wei, Zhang Hua, Wu Zhimin. Effect of operating in different cities and by different operational modes on real SEER of air-conditioner [J]. *Journal of University of Shanghai for Science and Technology*, 2007, 29(4): 391-394.)
- [39] Bavaresco M, Silva Machado R M E, Krelling A F, et al. Refining seasonal performance metrics for room air-conditioning in emerging markets: Integrating building simulations with real-world equipment performance data [J]. *Energy and Buildings*, 2025, 338: 115731.
- [40] 李寅, 吴晓丽. 国外空调器能效标准中气候分区及能源消耗效率计算方法分析[J]. *制冷与空调(北京)*, 2025, 25(5): 41-47. (Li Yin, Wu Xiaoli. Climate zoning and calculation methods of energy efficiency in foreign energy efficiency standards for air conditioners [J]. *Refrigeration and Air-conditioning*, 2025, 25(5): 41-47.)
- [41] 陈焕新, 曾宇柯, 成建宏, 等. 不同气候区域对多联机空调能效标准指标的影响[J]. *制冷学报*, 2021, 42(2): 38-44. (Chen Huanxin, Zeng Yuke, Cheng Jianhong, et al. Influence of different climatic regions on the energy efficiency standard index of variable refrigerant flow system [J]. *Journal of Refrigeration*, 2021, 42(2): 38-44.)
- [42] 朱玉鑫, 李红旗, 王东越, 等. 变频空调器能效的地域差异研究[J]. *制冷学报*, 2018, 39(6): 77-83. (Zhu Yuxin, Li Hongqi, Wang Dongyue, et al. Research on regional annual performance factor of inverter air conditioner [J]. *Journal of Refrigeration*, 2018, 39(6): 77-83.)
- [43] Wan H, Cao T, Hwang Y, et al. A comprehensive review of life cycle climate performance (LCCP) for air conditioning systems [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2021, 130: 187-198.
- [44] 夏玉娟, 苏悦盈, 何冠成, 等. 空调器能效与碳效等级研究[J]. *环境技术*, 2024, 42(10): 193-198. (Xia Yujuan, Su Yueying, He Guancheng, et al. Research on the energy efficiency and carbon efficiency level of air conditioners [J]. *Environmental Technology*, 2024, 42(10): 193-198.)
- [45] 李小燕, 宁前, 何国庚. 采用R290和R32的家用空调器全生命周期碳排放研究[J]. *低温工程*, 2021(2): 33-40. (Li Xiaoyan, Ning Qian, He Guogeng. Study on carbon emission of household air conditioners using R290 and R32 as refrigerants in whole life cycle [J]. *Cryogenics*, 2021(2): 33-40.)

通信作者简介

丁国良,男,教授,博士生导师,上海交通大学机械与动力工程学院,021-34206378, E-mail: glding@sjtu.edu.cn. 研究方向: 制冷空调装置的仿真、优化与新工质应用。

About the corresponding author

Ding Guoliang, male, professor, Ph. D. supervisor, School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, 86-21-34206378, E-mail: glding@sjtu.edu.cn. Research fields: simulation and optimization for refrigeration and air conditioning appliances as well as utilization of new refrigerants.