

文章编号:0253-4339(XXXX)XX-0001-10  
doi: 10.12465/issn.0253-4339.20251027002

## 房间空调器动态能效测试的不确定度分析

王龙炎<sup>1</sup> 曹昊敏<sup>1</sup> 丁国良<sup>1</sup> 丁屹<sup>2</sup> 成建宏<sup>3</sup>

(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** 评估房间空调器动态能效测试的可靠性和提高测试精度,需要对动态测试的不确定度进行评定。本文将动态测试不确定度的来源分为系统误差、随机误差和时间延迟误差,其中系统误差和随机误差造成的不确定度采用GUM法和MCM法进行评估,并按照GB 7725—2022《房间空气调节器》中的稳态测量不确定度规定进行设置;时间延迟误差采用一阶模型进行建模分析,并按照普遍的传感器响应时间进行设置。以额定制冷量3.5 kW空调器为例计算不确定度,结果表明:系统误差和随机误差造成的相对拓展不确定度为3.8%,时间延迟造成的不确定度为1.0%,动态能效值的整体不确定度为3.9%;拓展至其他能力值的空调器,其动态能效测试的不确定度均应在3.2%~5.4%。不确定度贡献分析结果表明,空调器动态测试的不确定度取决于系统误差对能力测量造成的不确定度,室内侧进出风湿球温度的测量精度对能力测量不确定度贡献最为显著。

**关键词** 动态测试;不确定度;房间空调器;空气焓差法;时间延迟

中图分类号:TB663;TM925.1

文献标识码:A

## Uncertainty Evaluation of Dynamic Energy Efficiency Testing for Room Air Conditioner

Wang Longyan<sup>1</sup> Cao Haomin<sup>1</sup> Ding Guoliang<sup>1</sup> Ding Yi<sup>2</sup> Cheng Jianhong<sup>3</sup>

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

**Abstract** To evaluate the reliability and increase the accuracy of dynamic energy efficiency testing of room air conditioners, uncertainty quantification of the dynamic test is essential. In this study, we categorize the uncertainty sources of dynamic testing into three types: systematic, random, and time-delay errors. The uncertainty resulting from systematic and random errors was evaluated using the GUM and MCM methods, with the error limits set based on the steady-state measurement uncertainty requirements specified in GB 7725—2022 Room Air Conditioners. The time-delay error was modeled and analyzed using a first-order model, with the sensor response time set based on common values. Using an air conditioner with a rated cooling capacity of 3.5 kW as an example, the uncertainty calculation results showed that the relative expanded uncertainty caused by systematic and random errors was 3.8%, and the uncertainty due to the time delay was 1.0%, leading to a total uncertainty of 3.9% in the dynamic energy efficiency. Extending to other air conditioners with various capacities, the total uncertainty should be in the range of 3.2% to 5.4%. Contribution analysis revealed that the uncertainty in capacity measurement caused by systematic error is the primary factor affecting the uncertainty in dynamic energy efficiency testing. Concerning the capacity measurement, the accuracy of the inlet and outlet wet-bulb temperatures of the indoor side makes the most significant contribution.

**Keywords** dynamic testing; uncertainty; room air conditioner; air-enthalpy method; time delay

动态能效测试通过实时测量房间空调器在内置控制策略下的运行性能,能够真实地反映其实际运行状态,是空调器能效评价的发展方向<sup>[1]</sup>。目前,德国<sup>[2]</sup>和加拿大<sup>[3]</sup>已经制定了相关标准;国际标准化组织已经出版了相关标准草案<sup>[4]</sup>;中国的标准也已立项,正在不断修订和完善<sup>[5]</sup>。

动态能效相关标准的制定和实验室改造需要对测量不确定度进行评定。一方面,动态能效标准中需要确定能效等级,等级间的差值应至少大于测量的不确定度的2倍才能保证产品性能等级测定的可靠性<sup>[6]</sup>。另一方面,提升实验测试的精度,需要确定对测量不确定度贡献最大的测量参数。因此,需要

收稿日期:2025-10-27;修回日期:2025-11-20;录用日期:2026-01-13

准确评估动态能效的测量不确定度以及各测量参数对不确定度的贡献。

测量不确定度的评定标准是国家计量技术规范 JJF 1059. 1—2012《测量不确定度的评定与表示》<sup>[7]</sup>和 JJF 1059. 2—2012《用蒙特卡洛法评定测量不确定度》<sup>[8]</sup>。这 2 份标准中分别规定了不确定度评定的 2 种方法,包括 GUM 法(Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement)和 MCM 法(Monte Carlo Method)。2 种方法具有各自的优势和局限性,GUM 法通过合成和传播输入量不确定度来计算输出量不确定度,能够提供准确的不确定度数值,但无法获得不确定度的概率分布。MCM 法基于概率分布进行不确定度评定,通过对误差源的随机模拟和大量重复计算,能够获得测量不确定度的概率分布,但每次不确定度模拟数值具有随机性。因此,在实际的测量不确定度评定工作中,通常使用这 2 种方法相互补充和校验<sup>[9]</sup>。

GUM 法和 MCM 法 2 种方法已被应用于房间空调器性能测试不确定度评定,但现有研究仅针对稳态性能测试,例如:一些研究使用 GUM 法对空气焓差法测试中风量计算不确定度<sup>[10]</sup>、空气焓差法单个工况点的制冷量测量不确定度<sup>[11]</sup>、稳态能效 APF 测量不确定度<sup>[12]</sup>进行分析;也有研究对比使用 GUM 法和 MCM 法 2 种方法对单个工况点制冷量的不确定度<sup>[13]</sup>和对稳态 APF 的不确定度<sup>[14]</sup>进行分析。

动态测试在测试方法和能效计算上,均与稳态测试存在明显区别,对应的不确定度评定也更为复杂。稳态测试中,只需要测量空调器稳定运行状态下少量时刻的性能参数;但在动态测试中,需要测量空调器包括启动和维温动态运行过程中各个时刻的空调器性能,测量结果为连续的时间序列。在能效计算方面,稳态测试将若干时刻的性能简单平均之后即可作为该工况下空调器的性能;而动态测试中,按照启动和维温阶段的时间占比加权平均得到每个工况下的周期平均性能。目前尚未有针对动态能效测量不确定度的相关研究。

本文目的是对动态能效测试中的不确定度进行分析,并评估各项测量误差对动态能效不确定度的贡献。

## 1 动态能效测试的不确定度来源

动态能效值 DAPF(dynamic annual performance factor)由制冷和制热季节总负荷除以制冷和制热季节总耗电量计算得到,如式(1)所示<sup>[15]</sup>。

$$F = \frac{\sum [L_c(t_j) \times n(t_j)] + \sum [L_h(t_j) \times n(t_j)]}{\sum \left[ \frac{L_c(t_j)}{E_c(t_j)} \times n(t_j) \right] + \sum \left[ \frac{L_h(t_j)}{E_h(t_j)} \times n(t_j) \right]} \quad (1)$$

式中: $F$ 为空调器的动态能效 DAPF 值; $L$ 为建筑负荷, kW; $E$ 为空调器的周期能效值; $n(t_j)$ 为对应室外温度  $t_j$  下的运行时间, h;下标 c 和 h 分别表示制冷和制热工况。

对于制冷和制热工况下室外温度为  $t_j$  时的周期能效值,由对应的制冷或制热动态测试 A、B 和 C 工况的周期能效分段线性插值得到,如式(2)所示。

$$E(t_j) = \begin{cases} E(t_A) & t_j < t_A \\ E(t_A) + \frac{E(t_B) - E(t_A)}{t_B - t_A} (t_j - t_A) & t_A \leq t_j < t_B \\ E(t_B) + \frac{E(t_C) - E(t_B)}{t_C - t_B} (t_j - t_B) & t_B \leq t_j < t_C \\ E(t_C) & t_j \geq t_C \end{cases} \quad (2)$$

式中: $t_A$ 、 $t_B$ 和 $t_C$ 分别表示动态测试 A、B 和 C 工况的室外温度, °C。

将式(2)代入式(1)推导化简可得,动态能效 DAPF 值仅与制冷 A、B、C 和制热 A、B、C 共计 6 个工况的周期能效相关,如式(3)所示。

$$F = f \left[ \begin{matrix} E(t_{c,A}), E(t_{c,B}), E(t_{c,C}), \\ E(t_{h,A}), E(t_{h,B}), E(t_{h,C}) \end{matrix} \right] \quad (3)$$

各个测试工况的周期能效由周期能力除以周期功率得到,如式(4)所示。周期能力和周期功率分别按照式(5)和式(6)由启动阶段和维温阶段每一时刻的测量值加权平均得到。

$$E(t_j) = \bar{Q}(t_j) / \bar{P}(t_j) \quad (4)$$

$$\bar{Q}(t_j) = \omega_{\text{start}} \times \frac{1}{N_{\text{start}}} \sum_{i=1}^{N_{\text{start}}} Q_{\text{start},i} + (1 - \omega_{\text{start}}) \times \frac{1}{N_{\text{stable}}} \sum_{i=1}^{N_{\text{stable}}} Q_{\text{stable},i} \quad (5)$$

$$\bar{P}(t_j) = \omega_{\text{start}} \times \frac{1}{N_{\text{start}}} \sum_{i=1}^{N_{\text{start}}} P_{\text{start},i} + (1 - \omega_{\text{start}}) \times \frac{1}{N_{\text{stable}}} \sum_{i=1}^{N_{\text{stable}}} P_{\text{stable},i} \quad (6)$$

式中: $\bar{Q}$ 和 $\bar{P}$ 分别为空调器的周期能力和周期功率, kW; $Q$ 和 $P$ 分别为空调器的瞬时能力和瞬时功率, kW; $\omega$ 为时间占比权重; $N$ 为测量数据点个数;下标 start 和 stable 分别表示启动阶段和维温阶段。

对于动态测试每一时刻,空调器功率直接由功率计测量得到;空调器的能力在制冷工况时由室内机的空气流量乘以进出口空气焓差计算得到,在制

热工况时由室内机的空气流量乘以进出口空气干球温度和定压比热乘积的差值计算得到,分别如式(7)和式(8)所示<sup>[16]</sup>。将空气物性代入式(7)和式(8)推导后可得,在制冷和制热工况时,空调器的能力都可以被表示为温度、压力等测量参数的函数,如式(9)所示。

$$Q_c = \frac{q_{vi}(h_{a1} - h_{a2})}{v'_n(1 + w_n)} \quad (7)$$

$$Q_h = \frac{q_{vi}(c_{pa2}t_{d2} - c_{pa1}t_{d1})}{v'_n(1 + w_n)} \quad (8)$$

$$Q = q(t_{d1}, t_{w1}, t_{d2}, t_{w2}, t_n, p_b, p_s, \Delta p, D) \quad (9)$$

式中: $Q_c$ 和 $Q_h$ 分别为空调器的制冷量和制热量,kW; $q_{vi}$ 为被测空调器室内测点的风量, $m^3/h$ ; $h_{a1}$ 和 $h_{a2}$ 分别为空调器回风和送风的空气焓值,kJ/kg; $v'_n$ 为喷嘴前测点处湿空气比容, $m^3/kg$ ; $w_n$ 为喷嘴前测点处湿空气含湿量,kg/kg(干空气); $c_{pa1}$ 和 $c_{pa2}$ 分别为空调器回风和送风的空气定压比热,J/(kg·°C); $t_{d1}$ 和 $t_{w1}$ 分别为被测空调器室内机回风的干球温度和湿球温度,°C; $t_{d2}$ 和 $t_{w2}$ 分别为被测空调器室内机出风的干球温度和湿球温度,°C; $t_n$ 为喷嘴测点处的干球温度,°C; $p_b$ 为室内侧大气压强,kPa; $p_s$ 为喷嘴前静压,kPa; $\Delta p$ 为喷嘴前后压差,kPa; $D$ 为喷嘴直径,m。

根据上述分析可知,动态能效的不确定度来源是动态测量过程中温度和压力等参数的测量误差,包括系统误差、随机误差和时间延迟误差,3类误差叠加之后造成测量值与真实值存在差距,如式(10)所示。

$$x_m = x_{true} + e_{sys} + e_{rand} + e_{delay} \quad (10)$$

式中: $x_m$ 和 $x_{true}$ 分别为温度、压力等传感器的测量值和真实值; $e_{sys}$ 、 $e_{rand}$ 和 $e_{delay}$ 分别为系统误差、随机误差和时间延迟误差。

系统误差表现为测量值与真实值之间存在的恒定的偏差,且偏差不随时间变化。系统误差的来源包括:温度和压力传感器漂移、传感器安装位置不当等。

随机误差表现为测量值围绕真实值的无规则波动,其特点是大小不定、方向随机,但通常遵循一定

的统计分布规律(如正态分布)。随机误差的来源包括:温度和压力传感器的精度、焓差室外部环境的温湿度扰动等。

时间延迟误差表现为测量值相对于真实值在时间上出现的滞后现象,来源包括:温度传感器的热惯性、焓差室中的气流传输延迟等。

## 2 不确定度计算方法

根据第1章的分析,动态能效测试不确定度来源于系统误差、随机误差和时间延迟误差这3类误差。其中,系统误差和随机误差均不具有方向性,即偏大或偏小并不确定,因此将这2类误差合并分析;而时间延迟误差具有方向性,即在时间上总是相对于真值是滞后,因此将时间延迟误差单独分析。动态能效值的不确定度可以由这2部分不确定度合成得到。

### 2.1 系统误差和随机误差计算方法

GUM法是评估不确定度的标准方法,MCM法通常作为GUM法的补充。本文使用这2种方法对系统误差和随机误差造成的不确定度进行分析,并相互校验计算结果。

#### 2.1.1 GUM方法

GUM方法在动态能效不确定度计算中可分为3个步骤:

1)计算每一时刻空调器瞬时能力和功率的不确定度。

根据ISO/TS 16491《Guidelines for the evaluation of uncertainty of measurement in air conditioner and heat pump cooling and heating capacity tests》<sup>[17]</sup>,空调器瞬时能力和功率的不确定度由A类不确定度和B类不确定度合成得到。A类不确定度由测量重复性引入,可根据贝塞尔公式计算。B类不确定度是由传感器的测量误差造成的,包括系统误差不确定度和随机误差不确定度,可分别通过各被测量的灵敏度系数和误差数值计算。以空调器的瞬时能力值为例,不确定度计算如式(11)所示。

$$\left\{ \begin{aligned} u(Q) &= \sqrt{[u_A(Q)]^2 + [u_{sys}(Q)]^2 + [u_{rand}(Q)]^2} \\ u_A(Q) &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Q_i - \bar{Q})^2}{N(N-1)}} \\ [u_{sys}(Q)]^2 &= [c_{t_{d1}} u_{sys}(t_{d1})]^2 + [c_{t_{w1}} u_{sys}(t_{w1})]^2 + [c_{t_{d2}} u_{sys}(t_{d2})]^2 + [c_{t_{w2}} u_{sys}(t_{w2})]^2 + [c_{t_n} u_{sys}(t_n)]^2 + [c_{p_b} u_{sys}(p_b)]^2 + \\ &\quad [c_{p_s} u_{sys}(p_s)]^2 + [c_{\Delta p} u_{sys}(\Delta p)]^2 + [c_D u_{sys}(D)]^2 \\ [u_{rand}(Q)]^2 &= [c_{t_{d1}} u_{rand}(t_{d1})]^2 + [c_{t_{w1}} u_{rand}(t_{w1})]^2 + [c_{t_{d2}} u_{rand}(t_{d2})]^2 + [c_{t_{w2}} u_{rand}(t_{w2})]^2 + [c_{t_n} u_{rand}(t_n)]^2 + [c_{p_b} u_{rand}(p_b)]^2 + \\ &\quad [c_{p_s} u_{rand}(p_s)]^2 + [c_{\Delta p} u_{rand}(\Delta p)]^2 + [c_D u_{rand}(D)]^2 \end{aligned} \right. \quad (11)$$

式中： $u_A(Q)$ 为A类不确定度； $u_{\text{sys}}(Q)$ 为系统误差对应的不确定度； $u_{\text{rand}}(Q)$ 为随机误差对应的不确定度； $N$ 为动态测试过程中记录的时间点数量； $c_x$ 为测量参数的灵敏度系数，通过微扰法获得； $u_{\text{sys}}(x)$ 和 $u_{\text{rand}}(x)$ 分别为各个测量参数的系统误差和随机误差。

2)计算周期性能的不确定度。

周期性能的不确定度根据不确定度的传播计算

$$u(\bar{Q}) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left( \frac{\partial \bar{Q}}{\partial Q_i} \right)^2 u^2(Q_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial \bar{Q}}{\partial Q_i} \frac{\partial \bar{Q}}{\partial Q_j} u(Q_i) u(Q_j) r(Q_i, Q_j)} \quad (12)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} u(\bar{Q}) = \sqrt{[u_A(\bar{Q})]^2 + [u_{\text{sys}}(\bar{Q})]^2 + [u_{\text{rand}}(\bar{Q})]^2} \\ u_A(\bar{Q}) = u_A(Q) \\ u_{\text{sys}}(\bar{Q}) = \omega_{\text{start}} \times \frac{1}{N_{\text{start}}} \sum_{i=1}^{N_{\text{start}}} u_{\text{sys}}(Q_{\text{start},i}) + (1 - \omega_{\text{start}}) \times \frac{1}{N_{\text{stable}}} \sum_{i=1}^{N_{\text{stable}}} u_{\text{sys}}(Q_{\text{stable},i}) \\ u_{\text{rand}}(\bar{Q}) = \sqrt{\sum_{i=1}^{N_{\text{start}}} \left[ \omega_{\text{start}} \times \frac{1}{N_{\text{start}}} u_{\text{sys}}(Q_{\text{start},i}) \right]^2 + \sum_{i=1}^{N_{\text{stable}}} \left[ (1 - \omega_{\text{start}}) \times \frac{1}{N_{\text{stable}}} u_{\text{sys}}(Q_{\text{stable},i}) \right]^2} \end{array} \right. \quad (13)$$

周期平均能效由周期平均能力除以周期平均功率计算得到，其不确定度可以按照式(14)进行计算。

$$u[E(t_j)] = \frac{\bar{Q}(t_j)}{\bar{P}(t_j)} \sqrt{\left( \frac{u[\bar{P}(t_j)]}{\bar{P}(t_j)} \right)^2 + \left( \frac{u[\bar{Q}(t_j)]}{\bar{Q}(t_j)} \right)^2} \quad (14)$$

3)计算动态能效 DAPF 的不确定度。

动态能效 DAPF 值由各个工况的周期能效计算得到，则动态能效的不确定度可以由各个工况周期能效的灵敏度系数和不确定度计算得到，如式(15)所示。

$$u(F)_{\text{sys+rand}} = \sqrt{\left[ c_{E(T_{c,A})} u(E(T_{c,A})) \right]^2 + \left[ c_{E(T_{c,B})} u(E(T_{c,B})) \right]^2 + \left[ c_{E(T_{c,C})} u(E(T_{c,C})) \right]^2 + \left[ c_{E(T_{h,A})} u(E(T_{h,A})) \right]^2 + \left[ c_{E(T_{h,B})} u(E(T_{h,B})) \right]^2 + \left[ c_{E(T_{h,C})} u(E(T_{h,C})) \right]^2} \quad (15)$$

式中： $u(F)_{\text{sys+rand}}$ 为由系统误差和随机误差造成动态能效值的不确定度； $c_{E(t)}$ 为各个工况周期能效的灵敏度系数。

### 2.1.2 MCM 方法

MCM法进行模拟计算时，首先按照误差的概率分布生成带有误差的测量参数，接着利用加入了误差的测量参数计算在各个工况下的周期能效以及动态能效 DAPF 值，最后通过统计大量模拟结果获得能效不确定度的概率分布，并计算标准差作为不确定度。为确保获得准确的不确定度模拟结果，根据 JJF 1059.2—2012《用蒙特卡洛法评定测量不确定度》<sup>[8]</sup>，在 95% 的置信度下，本文选择模拟次数为

公式(12)进行合成，其中， $r(Q_i, Q_j)$ 为被测量之间的相关系数。

A类不确定度和系统误差均不随时间变化，相关系数 $r(Q_i, Q_j)=1$ ；而随机误差在时间上相互独立，相关系数 $r(Q_i, Q_j)=0$ 。将相关系数代入式(12)对不确定度进行合成，则周期性能的不确定度可依据式(13)进行计算。

20万次。

### 2.2 时间延迟误差计算方法

时间延迟误差的影响通过增加响应时间的方法进行分析。首先根据原始数据计算空调器各个工况的周期能效和动态能效值。然后对原始数据增加响应时间，按照增加响应时间后的数据计算空调器各个工况的周期能效和动态能效值，并与原始数据的计算结果进行对比，得到能效的偏差值作为时间延迟误差造成的不确定度，如式(16)所示。

$$u(F)_{\text{delay}} = \frac{|F_{\text{delay}} - F_m|}{F_m} \quad (16)$$

式中： $u(F)_{\text{delay}}$ 为由时间延迟误差造成的不确定度； $F_{\text{delay}}$ 和 $F_m$ 分别为增加响应时间后和原始测量得到的动态能效值。

根据 JJF 1029—2024《温度传感器动态响应校准规范》<sup>[18]</sup>，传感器延迟按照一阶系统的方法进行建模，如式(17)所示。

$$x_{\text{delay}} = x_m - \tau \frac{dx_m}{dt} \quad (17)$$

式中： $x_{\text{delay}}$ 为增加响应时间后的测量参数； $\tau$ 为传感器的响应时间，s。

### 2.3 总体不确定度计算方法

系统误差和随机误差造成的不确定度与时间延迟造成的不确定度是相互独立的，则动态能效值的总体不确定度 $u(F)$ 可以根据式(18)合成得到。

$$u(F) = \sqrt{[u(F)_{\text{sys+rand}}]^2 + [u(F)_{\text{delay}}]^2} \quad (18)$$

### 3 不确定度计算结果

#### 3.1 计算条件

根据第2章的推导,GUM法计算不确定度需要确定温度、压力等传感器系统误差和随机误差的数值;MCM法计算不确定度还需要确定系统误差和随机误差的概率分布;时间延迟误差的不确定度计算需要确定传感器的响应时间;不确定度传播中各个灵敏度系数的计算需要由实验数据确定。因此需要确定系统误差和随机误差的数值和概率分布、传感器响应时间以及实验测试数据。

对于传感器系统误差和随机误差的数值,本文参照Sun Shaobo等<sup>[19]</sup>的研究,取系统误差与随机误差数值相同,并依据GB 7725—2022《房间空气调节器》<sup>[20]</sup>中关于稳态测量不确定度的要求进行设定;对于传感器系统误差和随机误差的概率分布,依据ISO/TS 16491《Guidelines for the evaluation of uncertainty of measurement in air conditioner and heat pump cooling and heating capacity tests》<sup>[17]</sup>,系统误差按照矩形分布进行设置,随机误差按照正态分布进行设置。各测量参数系统误差和随机误差的数值与概率分布如表1所示,系统误差和随机误差的概率分布分别呈矩形分布和正态分布,包含因子分别为 $k = \sqrt{3}$ 、 $k = 2$ 。

对于传感器的响应时间,温度测量的响应时间通常远大于压力测量的响应时间<sup>[21]</sup>,因此本文主要分析干湿球温度测量响应时间对动态能效值的影响。空气焓差法性能测试中,通常选择铂电阻对温度进行测量,其延迟时间普遍约在150 s。因此,干湿球温度测量的延迟时间在0~300 s内按照间隔50 s设置,并以150 s作为延迟时间的典型值。

对于实验测试数据,本文以最常用的额定制冷量3.5 kW空调器的动态能效测试数据为例进行不确定度的分析。参照文献<sup>[15]</sup>的测量方法,每个动态能效测试工况测试4 h,测试中各个传感器的采样时间间隔为1 s。

使用上述计算条件,计算得到系统误差和随机误差造成的不确定度、时间延迟误差造成的不确定度,以及动态能效的总体不确定度结果分别展示在第3.2、3.3和3.4节。

#### 3.2 系统误差和随机误差的计算结果

##### 3.2.1 GUM方法

GUM法不确定度评定结果为每个步骤计算的不确定度数值,包括各个时刻空调器瞬时性能的不确

表1 测量参数的系统误差和随机误差  
Tab.1 Systematic and random errors of the measured parameters

测量参数	测量不确定度	
	系统误差	随机误差
干球温度	0.2 °C	0.2 °C
湿球温度	0.2 °C	0.2 °C
大气压强	1.0 kPa	1.0 kPa
喷嘴前静压	1.0 Pa	1.0 Pa
喷嘴前后压差	5%	5%
喷嘴直径	0.02 mm	0.02 mm
功率	0.5%	0.5%

定度数值、各个工况周期性能的不确定度数值以及最终动态能效值的不确定度数值。

各个时刻空调器瞬时能力和功率的不确定度计算结果如图1所示,图中空调器能力和功率曲线上下填充范围表示测量的标准不确定度。在整个动态测试过程中,空调器瞬时能力具有较大的不确定度且每个时刻的不确定度保持在相同水平,在图中能力的不确定度范围的边界基本与能力曲线平行;空调器瞬时功率测量的不确定度很小,在图中功率的不确定度范围基本与功率的变化曲线重合。

各个工况周期性能的不确定度计算结果如图2所示。图2(a)为各个工况的周期能力和周期功率的不确定度计算结果,周期能力值越小,相对不确定度越大,制冷和制热各工况的周期能力的不确定度区间分别为4.1%~9.8%和1.7%~2.0%。由于功率计采用相对误差,各个工况周期功率的相对不确定度是相同的,均为0.3%。图2(b)所示为各个工况的周期能效的不确定度,由于周期功率的不确定度远小于周期能力的不确定度,各工况的周期能效不确定度取决于周期能力的不确定度,制冷和制热各工况的周期能效的不确定度区间分别为4.1%~9.8%和1.7%~2.0%。

采用GUM法计算得到各个工况周期能效的不确定度如表2所示。使用各工况周期能效的不确定度合成动态能效DAPF值的不确定度,结果表明,被测空调器的DAPF值为4.219,标准不确定度数值为0.0805,取包含因子 $k=2$ ,则拓展不确定度为0.1610,相对拓展不确定度为3.8%。

##### 3.2.2 MCM方法

MCM法不确定度评定结果为不确定度的概率分布以及大致数值,包括各个工况周期能性能和动态能效值的不确定度概率分布和大致数值。

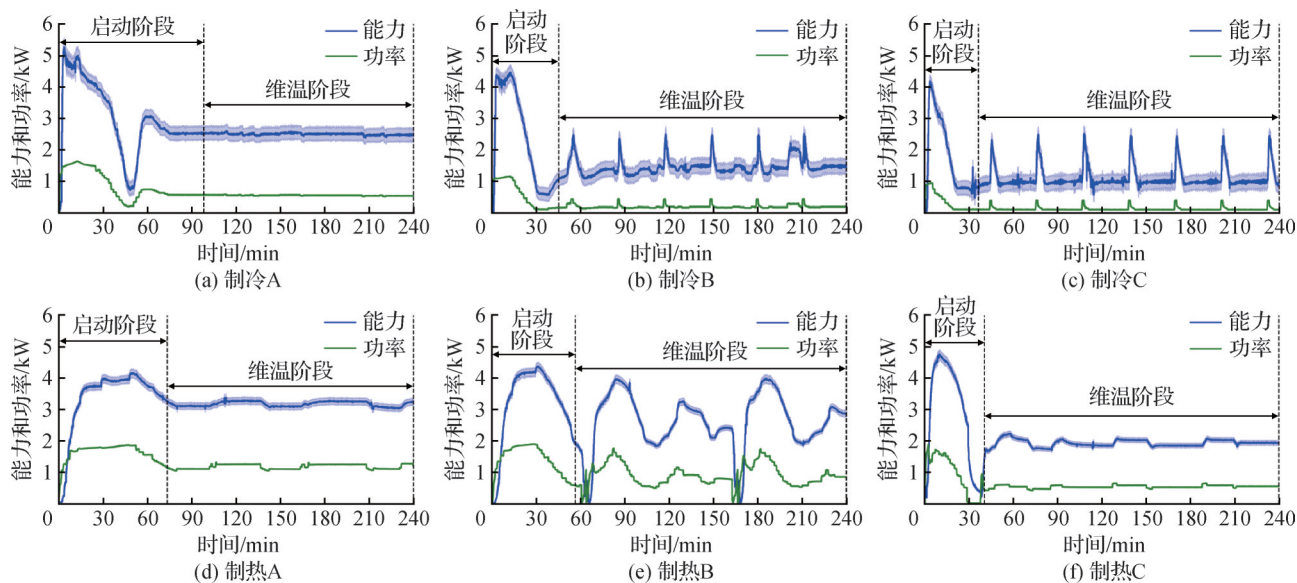
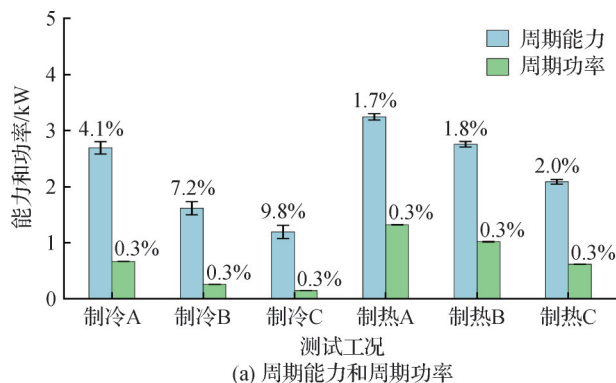
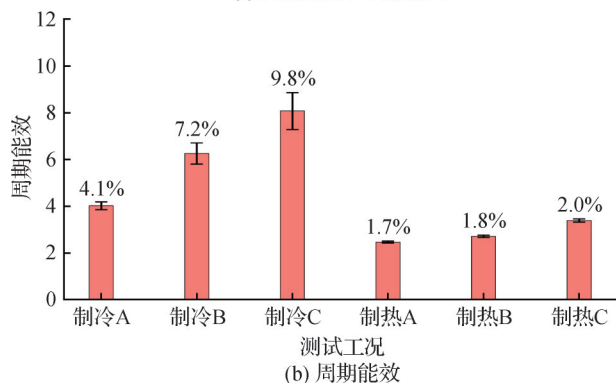


图1 瞬时能力和功率的不确定度

Fig.1 Uncertainty of instantaneous capacity and power



(a) 周期能力和周期功率



(b) 周期能效

图2 周期平均性能的不确定度

Fig.2 Uncertainty of cycle-averaged performance

MCM法对各个工况周期性能不确定度的概率分布规律相同,以制冷A工况为例,周期能力、周期功率和周期能效的不确定度概率分布分别如图3(a)、(b)和(c)所示。周期能力的不确定度近似遵循三角分布,周期功率的不确定度近似遵循矩形分布,周期能效的不确定度近似遵循三角分布。

MCM模拟各个工况周期性能的不确定度数值如表3所示,制冷工况周期能效的相对不确定度区间为

表2 GUM法不确定度计算结果

Tab.2 Uncertainty calculation results of GUM method

工况	能效	灵敏度系数	不确定度
制冷A	4.023	0.1164	0.165
制冷B	6.261	0.1165	0.450
制冷C	8.086	0.0651	0.791
制热A	2.462	0.2741	0.042
制热B	2.706	0.3135	0.048
制热C	3.395	0.2788	0.067

4.1%~9.7%,制热工况周期能效的相对不确定度区间为1.7%~2.0%。MCM法对于空调器各个工况周期性能的不确定度数值计算结果能够与GUM方法的计算结果相吻合。

动态能效 DAPF 的 MCM 模拟结果如图 4 所示。动态能效 DAPF 值基本遵循正态分布的曲线,均值为 4.219,标准不确定度为 0.081,取包含因子  $k=2$ ,则相对拓展不确定度为 3.8%。动态能效值不确定度的 MCM 法模拟结果也能够与 GUM 方法计算结果一致。

### 3.3 时间延迟误差的计算结果

干球温度和湿球温度测量延迟造成的对动态能效值偏差如表 4 所示。动态能效值的测量偏差随着干球温度和湿球温度测量延迟时间的增大而增大,且干湿球温度延迟的影响会相互叠加,当干球温度和湿球温度测量的延迟时间均取典型值 150 s 时,动态能效值的偏差为 0.97%。

### 3.4 动态能效总体不确定度

根据 3.2 节和 3.3 节的计算,系统误差和随机误

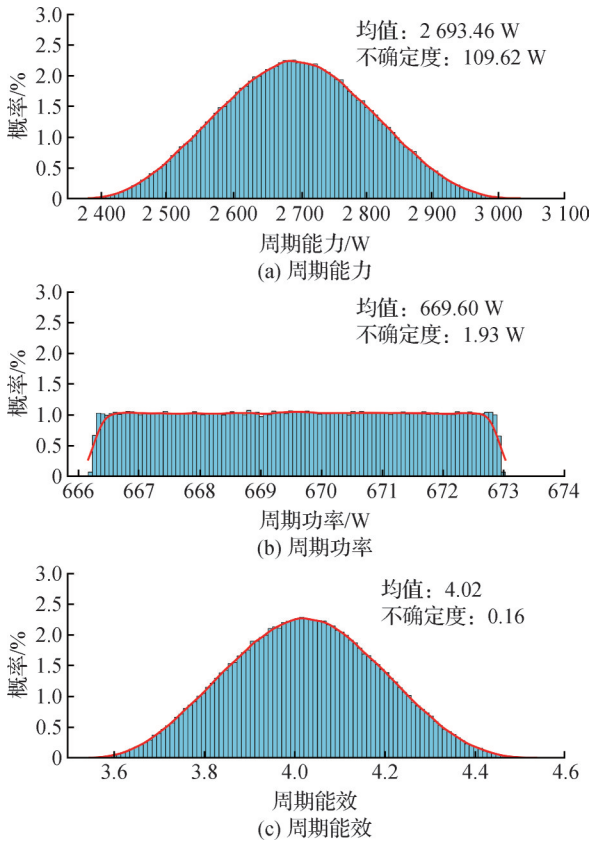


图3 周期平均性能不确定度的概率分布

Fig.3 Probability distribution of cycle-averaged performance uncertainty

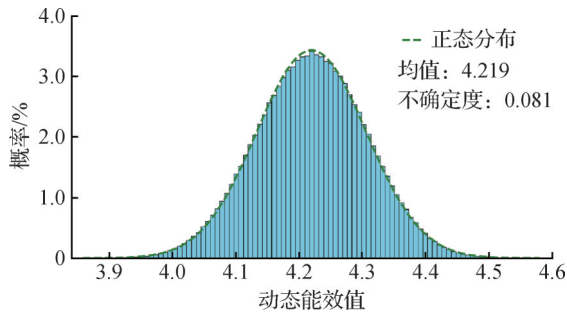


图4 动态能效值的MCM法模拟结果

Fig.4 MCM simulation results of DAPF value

差造成的不确定度为3.8%;典型时间延迟误差造成的不确定度约为1.0%。将系统误差和随机误差造成

的不确定度,以及时间延迟误差造成的不确定度代入式(18)计算可得,动态能效值的总体不确定度为3.9%。

## 4 分析与讨论

### 4.1 不确定度贡献分析

减少测试的不确定度,需要明确影响不确定度的关键因素,为此需要对于不确定度中各分量的贡献进行分析。

动态能效值的不确定度中,各工况周期能效不确定的贡献占比如图5所示。所有测试工况中,制冷B和制冷C工况对动态能效值的不确定度贡献最大,占比分别为42.4%和40.9%。

各工况周期能效的不确定度中,系统误差和随机误差造成的不确定度大于时间延迟误差造成的不确定度;对于系统误差和随机误差,系统误差在测试过程中不断累积,而随机误差在测试过程中正负抵消,因此系统误差对动态能效不确定度贡献最大。动态能效所有被测量中,空调器能力的不确定度远大于功率测量的不确定度。综合误差来源和被测量可知,系统误差对于空调器能力测量造成的不确定度对动态能效值总体不确定度的贡献最大。

系统误差对空调器周期能力的不确定度贡献可按照温度、压力等传感器误差分量进一步划分,各测量参数的不确定度分量占比如图6所示。制冷工况中,室内侧进风和出风的湿球温度对能力测量的不确定度贡献最大,占比均在80%以上。制热工况中,室内侧进风和出风的干球温度和喷嘴压差对能力测量的贡献最大,占比接近100%。

减小动态测试不确定度的关键是提高湿球温度的测量精度。目前空气焓差室中湿球温度普遍采用湿纱布包裹铂电阻的方法测量<sup>[22]</sup>,该方法对湿球温度测量容易受到环境因素的干扰,存在较大测量误差。换用冷镜式露点仪是提高湿球温度测量精度的

表3 周期性能MCM法的不确定度模拟结果

Tab.3 MCM simulation results of cycle-averaged performance

工况	周期能力/W		周期功率/W		周期能效	
	均值	不确定度(相对不确定度)	均值	不确定度(相对不确定度)	均值	不确定度(相对不确定度)
制冷A	2693.46	109.62(4.1%)	669.60	1.93(0.3%)	4.023	0.164(4.1%)
制冷B	1618.64	115.49(7.1%)	258.45	0.75(0.3%)	6.263	0.447(7.1%)
制冷C	1192.68	115.77(9.7%)	147.52	0.43(0.3%)	8.085	0.785(9.7%)
制热A	3246.59	55.34(1.7%)	1318.72	3.82(0.3%)	2.462	0.043(1.7%)
制热B	2756.46	49.16(1.8%)	1018.61	2.94(0.3%)	2.706	0.049(1.8%)
制热C	2086.63	40.53(2.0%)	614.71	1.78(0.3%)	3.394	0.067(2.0%)

表4 干湿球温度测量延迟对动态能效值的影响

Tab.4 Impact of dry-bulb and wet-bulb temperature measurement delay on DAPF value

动态能效值偏差	干球温度测量延迟/s						
	0	50	100	150	200	250	300
0	0	0.15%	0.31%	0.48%	0.67%	1.31%	1.64%
50	0.16%	0.32%	0.48%	0.65%	0.85%	1.06%	1.28%
100	0.31%	0.46%	0.63%	0.81%	1.02%	1.24%	1.47%
湿球温度测量延迟/s	150	0.49%	0.62%	0.78%	0.97%	1.18%	1.67%
	200	0.67%	0.81%	0.96%	1.14%	1.34%	1.86%
	250	0.92%	1.05%	1.18%	1.34%	1.54%	2.05%
	300	1.19%	1.30%	1.43%	1.58%	1.76%	2.25%

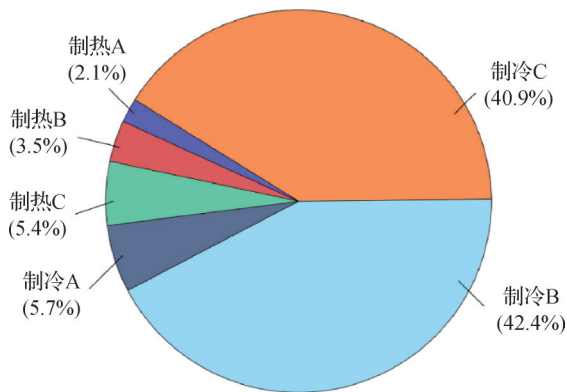


图5 各测量工况对周期能力的不确定度贡献

Fig.5 Uncertainty contribution of each test condition

可行方法,例如按照第3.1节中的计算条件,在其他传感器精度保持不变时,使用冷镜式露点仪可将湿球温度的测量精度提升至0.1℃,则总体动态能效测试的不确定度可减少至2.5%。

#### 4.2 额定能力的代表性分析

本文选择额定制冷量为3.5kW空调器的动态能

效测试数据作为算例来评估不确定度,因此需要对该算例中额定能力值的代表性进行分析。

JJF 1059.1—2012《测量不确定度评定与表示指南》<sup>[7]</sup>中表示,对合成不确定度影响很小的分量可以忽略。对式(9)~式(12)进行简化,则制冷和制热工况周期能效的相对不确定度可分别被近似地表示为式(19)和式(20)的形式,其中均不包含空调器的能力,即周期能效的相对不确定度与空调器的能力无关。

$$\frac{u[E(t_j)]}{E(t_j)} \approx \frac{1}{|\bar{h}_{a1} - \bar{h}_{a2}|} \sqrt{\left[ \frac{\partial \bar{h}_{a1}}{\partial \bar{t}_{w1}} u_{\text{sys}}(\bar{t}_{w1}) \right]^2 + \left[ \frac{\partial \bar{h}_{a2}}{\partial \bar{t}_{w2}} u_{\text{sys}}(\bar{t}_{w2}) \right]^2} \quad (19)$$

$$\frac{u[E(t_j)]}{E(t_j)} \approx \sqrt{\frac{[u_{\text{sys}}(\bar{t}_{d1})]^2 + [u_{\text{sys}}(\bar{t}_{d2})]^2}{(\bar{t}_{d1} - \bar{t}_{d2})^2} + \left[ \frac{u_{\text{sys}}(\Delta \bar{p})}{2\Delta \bar{p}} \right]^2} \quad (20)$$

式中:符号上方横线表示动态测试周期内测量量的

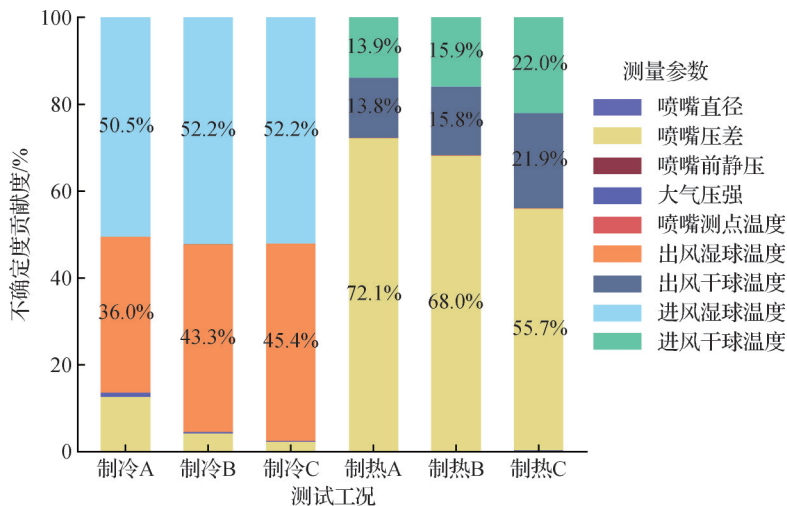


图6 各测量参数对周期能力的不确定度贡献

Fig.6 Uncertainty contribution of each measurement parameter to cycle-averaged capacity

平均值。

将式(19)和式(20)代入式(15)对不确定度进行合成,则动态能效值的相对不确定度可以近似由式(21)进行计算。

$$\frac{u(F)}{F} = \sqrt{\sum \left[ \frac{\partial F/F}{\partial E(t_j)/E(t_j)} \frac{u[E(t_j)]}{E(t_j)} \right]^2} \quad (21)$$

式中:  $\frac{\partial F/F}{\partial E(t_j)/E(t_j)}$  为每个工况周期能效的 DAPF 占比

权重。

不同额定能力值的空调器,室内机的进出风的温度保持在近似水平,且各工况在动态能效值的占比权重接近,具体数值如表5所示。将表5的温度范围代入式(19)和式(20)计算得到每个工况周期能效的不确定度范围。将各工况的能效占比权重和周期能效的相对不确定度范围代入式(21)计算可得,不同额定能力的机型的动态能效相对不确定度区间均应在3.2%~5.4%(取包含因子 $k=2$ )。

表5 空调器普遍的进出风温度、能效占比权重和动态测试不确定度区间

Tab.5 Common inlet and outlet air temperatures, energy efficiency weights, and dynamic test uncertainty ranges for air conditioners

工况	进风温度		出风温度		能效占比权重/%	不确定度区间
	干球温度/°C	湿球温度/°C	干球温度/°C	湿球温度/°C		
制冷 A	27	21	16-18	16-17	11.2	3.4%~4.2%
制冷 B	27	23	21-22	20-21	17.4	5.6%~8.4%
制冷 C	27	24	22-23	22-23	12.6	8.4%~17.0%
制热 A	23	14	39-40	18-20	16.1	1.7%~1.8%
制热 B	23	14	38-40	18-20	20.2	1.7%~1.8%
制热 C	23	14	35-38	17-19	22.6	1.8%~2.0%

## 5 结论

本文通过采用GUM法和MCM法评估动态能效测试中传感器精度造成的不确定度,并采用一阶系统模型的方法评估传感器延迟造成的不确定度,进而合成总体不确定度。得到结论如下:

1)动态能效测量的不确定度来自测试中温度、压力等被测量的误差,包括系统误差,随机误差和时间延迟误差3部分。

2)系统误差和随机误差造成的不确定度可按照稳态不确定度评定的GUM法或MCM法计算,且2种方法可以相互校验;时间延迟误差造成的不确定度可按照一阶系统进行建模计算。

3)系统误差和随机误差按照标准中稳态误差规定进行设置,时间延迟误差按照典型的传感器响应时间进行设置,以一台额定制冷量为3.5 kW空调器的动态能效测试数据进行不确定度分析,系统误差和随机误差造成的相对拓展不确定度为3.8%,时间延迟误差造成的不确定度为1.0%,动态能效值的总体不确定度为3.9%。拓展至其他能力值的空调器,动态测试的不确定度均应在3.2%~5.4%。

4)减小动态能效测量不确定度最重要的是提高湿球温度的测量精度,将湿球温度的测量误差减小至0.1 °C可使动态能效值的不确定度减小至2.5%。

## 参考文献

- [1] 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(S1):215-220. (Yang Zixu, Shi Wenxing, Wang Baolong, et al. Performance measurement of air conditioning heat pump units: From steady conditions to actual operation [J]. Journal of Appliance Science & Technology, 2023(S1): 215-220.)
- [2] 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: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), 2019.
- [3] CSA SPE-07-2023 Load-based and climate-specific testing and rating procedures for heat pumps and air conditioners [S].
- [4] 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].
- [5] 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.)
- [6] 梁勇彪,许戈耀,谢宇航,等.基于冰浆制冷的标准冷

- 源及不确定度分析[J]. 制冷学报, 2024, 45(2): 135-142. (Liang Yongbiao, Xu Geyao, Xie Yuhang, et al. Standard cold source based on ice slurry refrigeration and uncertainty analysis[J]. Journal of Refrigeration, 2024, 45(2): 135-142.)
- [7] JJF 1059.1—2012 测量不确定度评定与表示[S]. (JJF 1059.1—2012 Evaluation and Expression of Uncertainty in Measurement[S].)
- [8] JJF 1059.2—2012 用蒙特卡洛法评定测量不确定度技术规范[S]. (JJF 1059.2—2012 Monte Carlo method for evaluation of measurement uncertainty[S].)
- [9] 刘园园, 杨健, 赵希勇, 等. GUM法和MCM法评定测量不确定度对比分析[J]. 计量学报, 2018, 39(1): 135-139. (Liu Yuanyuan, Yang Jian, Zhao Xiyong, et al. Comparative analysis of uncertainty measurement evaluation with GUM and MCM[J]. Acta Metrologica Sinica, 2018, 39(1): 135-139.)
- [10] 李雄林, 曹小林, 张明星, 等. 空调器性能测试中风量测量不确定度的研究[J]. 流体机械, 2008, 36(2): 10-13. (Li Xionglin, Cao Xiaolin, Zhang Mingxing, et al. Investigation of flux measurement uncertainty in the air conditioner performance-testing bench[J]. Fluid Machinery, 2008, 36(2): 10-13.)
- [11] 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.)
- [12] 马安娜, 吴晓丽, 赵玲倩, 等. 定频房间空调器APF的不确定度评定方法研究[J]. 家电科技, 2021(6): 88-93. (Ma Anna, Wu Xiaoli, Zhao Lingqian, et al. Research on uncertainty evaluation method of APF for fixed frequency room air conditioner [J]. Journal of Appliance Science & Technology, 2021(6): 88-93.)
- [13] 张子祺, 刘杰, 杨双, 等. 基于空气焓值法测量空调器制冷量的不确定度分析[J]. 家电科技, 2025, 1(1): 116-120. (Zhang Ziqi, Liu Jie, Yang Shuang, et al. Uncertainty analysis of air conditioning cooling capacity measurement based on air-enthalpy test method [J]. Journal of Appliance Science & Technology, 2025, 1(1): 116-120.)
- [14] 吴晓丽, 赵玲倩, 马安娜, 等. 采用MCM法和GUM法对房间空调器APF不确定度评定结果的对比分析[J]. 制冷与空调, 2022, 22(2): 74-79. (Wu Xiaoli, Zhao Lingqian, Ma Anna, et al. Comparison on APF uncertainty evaluation results of room air conditioner by MCM and GUM method [J]. Refrigeration and Air-Conditioning, 2022, 22(2): 74-79.)
- [15] 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. <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. <https://link.cnki.net/urlid/11.2182.TB.20250627.1334.002>.)
- [16] GB/T 37292—2019 试验用空气焓值法试验装置通用技术要求[S]. (GB/T 37292—2019 Air enthalpy testing facility for test—General technical requirements[S].)
- [17] ISO/TS 16491: 2012 Guidelines for the evaluation of uncertainty of measurement in air conditioner and heat pump cooling and heating capacity tests[S].
- [18] JJF 1049—2024 温度传感器动态响应校准规范[S]. (JJF 1049—2024 Calibration specification for temperature sensors dynamic response[S].)
- [19] Sun Shaobo, Wang Shengwei, Shan Kui. Flow measurement uncertainty quantification for building central cooling systems with multiple water-cooled chillers using a Bayesian approach [J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 202: 117857.
- [20] GB/T 7725—2022 房间空气调节器[S]. (GB/T 7725—2022 Room air conditioner [S].)
- [21] 李雄林. 空调器性能测试的误差分析及不确定度研究[D]. 长沙: 中南大学, 2007. (Li Xionglin. Study on measurement uncertainty and error analysis of air conditioner performance-testing [D]. Changsha: Central South University, 2007.)
- [22] 崔涛, 王超, 杨双, 等. 浅析空气焓差法测量制冷量不确定度的评定方法及其在试验中的影响[J]. 家电科技, 2019(6): 36-39. (Cui Tao, Wang Chao, Yang Shuang, et al. Evaluation of uncertainty of cooling capacity measurement by air enthalpy method and influence in the test[J]. Journal of Appliance Science & Technology, 2019(6): 36-39.)

#### 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.

(责任编辑: 田甜)