

文章编号:0253-4339(XXXX)XX-0001-12  
doi: 10.12465/issn.0253-4339.20250330002

# 基于动态用水模式的热泵与电热水器统一能效评价方法研究

夏玉娟<sup>1,2</sup> 陈海红<sup>1,2</sup> 亓新<sup>3</sup> 蔺昊欣<sup>1,2</sup> 吴晓丽<sup>4</sup> 石里明<sup>3</sup>

(1 中国标准化研究院 北京 100191; 2 国家市场监督管理总局重点实验室(能效水效及绿色化) 北京 102299;  
3 中国家用电器研究院 北京 100037; 4 中家院(北京)检测认证有限公司 北京 100176)

**摘要** 为解决热泵与电热水器能效评价指标不统一的问题,提出一种基于24 h动态用水实验的统一能效评价方法。通过分析我国居民热水使用习惯,建立了包含用水时间分布、温度需求和流量特征的典型用水模式,并设计了基于一次能源利用效率的统一评价指标。实验验证表明:热泵热水器一次能源效率(67.7%~99.2%)显著高于储水式电热水器(31.5%~36.4%),该方法能有效实现横向对比。

**关键词** 热泵热水器;储水式电热水器;动态用水模式;一次能源利用效率

中图分类号: TS914.25; TM925.32

文献标识码: A

## Research on Unified Energy Efficiency Evaluation Method for Heat Pumps and Electric Water Heaters Based on Dynamic Water Usage Mode

Xia Yujuan<sup>1,2</sup> Chen Haihong<sup>1,2</sup> Qi Xin<sup>3</sup> Lin Haoxin<sup>1,2</sup> Wu Xiaoli<sup>4</sup> Shi Liming<sup>3</sup>

(1. China National Institute of Standardization, Beijing, 100191, China; 2. Key Laboratory of Energy Efficiency, Water Efficiency and Greenization, State Administration for Market Regulation, Beijing, 102299, China; 3. China Household Electric Appliance Research Institute, Beijing, 100037, China; 4. CHEARI (Beijing) Certification & Testing Co., Ltd., Beijing, 100176, China)

**Abstract** To address the problems of inconsistent energy efficiency evaluation indicators between air source heat pumps and storage-type electric water heaters in China, this study proposes a unified energy efficiency evaluation method based on 24-h dynamic water usage tests. Based on an analysis of the hot-water usage habits of Chinese residents, a typical water usage pattern was established that included water usage time distribution, temperature demand, and flow characteristics. A unified evaluation index based on primary energy utilization efficiency was also designed. Experimental verification shows that the primary energy efficiency of heat pump water heaters (67.7%~99.2%) is significantly higher than that of storage electric water heaters (31.5%~36.4%).

**Keywords** heat pump water heater; storage type electric water heater; dynamic water usage mode; primary energy efficiency

## 1 研究背景与现状

生活热水能耗占我国建筑总能耗的10%~20%,是建筑节能的重点领域。作为主要的热水制备设备,空气源热泵热水器(air-source heat pump water heater, ASHWH)和储水式电热水器(electrical storage water heaters, ESWH)的市场占有率合计超过80%。

### 1.1 现行能效标准局限性

现行能效标准 GB 29541—2013(热泵热水机)<sup>[1]</sup>和 GB 21519—2008(储水式电热水器)<sup>[2]</sup>分别采用性能系数(COP, coefficient of performance)和“24 h固有能耗系数+热水输出率”作为评价指标,其局限性体现在3方面:

1) 指标不统一:电、热泵、燃气热水器分别采用不同能效参数(COP、热水输出率、热效率),导致横向对比困难;

2) 测试工况脱离实际:现有标准基于稳态传热模型,未考虑动态用水行为(如间歇放水、温度波动),测试结果与实际家庭全天候用水能效偏差显著;

3) 未涵盖待机能耗:现行标准忽略待机功耗对综合能效的影响<sup>[1-2]</sup>。

### 1.2 国际动态评价方法对比

欧盟(EN:2017)、美国(AHRI 1301:2013)及日本(JIS C 9220)已采用基于24 h动态用水模式的能效评价体系,通过模拟多次放水行为(如欧盟设定6次放

水、美国采用分时流量)量化全天综合能耗<sup>[3-6]</sup>,然而,其参数(如放水次数、流量)基于欧美家庭习惯,与我国居民晚间集中淋浴、厨房高频用水等特征不符。

### 1.3 国内近5年研究进展(2019—2024)

近年来,我国学者针对热水器动态能效评价方法开展了深入研究,尤其在用水行为建模、能效测试技术优化及多能源协同评价方面取得显著进展,为本研究提供了重要理论支撑与技术参考。

#### 1.3.1 用户用水行为精细化建模

王荣<sup>[7]</sup>虽开展了用水行为研究,但尚未建立与能效评价直接关联的测试方法。周晋等<sup>[8]</sup>提出基于蒙特卡洛模拟的用水行为模型,但未与能效测试方法结合。田帅<sup>[9]</sup>收集整理了1 688份问卷和48户住户的热水使用实测数据,基于分析结果建立了“基于生活热水使用行为的太阳能热水系统模拟分析模型”,并提出提升太阳能利用率的控制优化方法。田东东等<sup>[10]</sup>提出一种基于用水时段的电热水器保温算法,在不影响用户用水体验的基础上可节省大量电能。这些成果为动态用水模式设计提供了数据基础。

#### 1.3.2 能效测试方法创新

中家院(北京)检测认证有限公司在T/CAS 309—2018《智能储水式电热水器能效评价规范》<sup>[11]</sup>基础上,开发了多工况耦合测试平台,首次将环境温度波动( $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ )纳入能效评价体系,显著提升了测试结果的实际贴合度。

#### 1.3.3 多能源统一评价体系探索

刘振宇<sup>[12]</sup>提出基于全生命周期碳排放的热水器综合评价指标,将热泵、电热水器及燃气设备的碳排放强度折算为等效一次能源利用率,为统一能效标准提供了跨能源类型对比框架。此外团体标准T/CECA-G 0155—2023《制冷设备能效评价规范》<sup>[13]</sup>首次整合了太阳能辅助热泵动态能效测试方法,填补了复合能源系统评价空白。

#### 1.3.4 政策与标准迭代

2020年发布的GB/T 23137—2020《家用和类似用途热泵热水器》<sup>[14]</sup>新增了低温工况( $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ )下的COP考核要求,推动热泵技术在高寒地区的适用性。

团体标准T/CAS 580—2021虽引入动态测试概念,但未统一评价指标。团体标准T/CECA-G 0022—2019《家用和类似用途热水器能效测试计算方法》<sup>[15]</sup>,初步提出了基于全天用水模式的热水器能效测试计算方法。上述研究为本方法提供理论支撑,但尚未形成普适性解决方案。因此,亟需开发适合我国国情的统一能效评价体系,并开展广泛测试验证,持续修订完善。

## 1.4 本研究突破点

本研究在继承国内外成果的基础上,进一步实现4大创新:

1) 本土化用水模式优化:将晚间淋浴流量峰值从10 L/min提升至12 L/min,更贴合我国居民实际需求。

2) 动态环境工况集成:采用多工况测试方法,增加季节性温度梯度(15、20、25  $^{\circ}\text{C}$ )测试节点,提升评价体系的气候适应性。

3) 跨能源折算系数更新:引入刘振宇<sup>[12]</sup>的碳排放因子,将电力折算系数CC(kJ/kJ)从2.52调整为2.48(基于2022年火电煤耗297 g/(kW·h)),增强一次能源利用效率( $\eta$ )计算的时效性。

4) 基于中国家庭动态用水行为提出统一能效测试方法:以40  $^{\circ}\text{C}$ 混合水量( $V_{40}$ )量化制热水能力,以 $\eta$ 综合反映运行与待机能耗,解决指标分散、工况失真问题。

## 2 我国居民热水使用行为特征

### 2.1 时间分布特征

通过对我国用户用水行为的研究<sup>[7]</sup>发现,目前58.3%的中国家庭在洗澡、洗脸、洗手、洗脚、做饭(包括煮饭、洗菜、洗碗)及洗衣服这6项基本活动中使用热水。使用热水的家庭一天24 h用水时间分布如图1所示。本研究还通过问卷调研了6 544位电热水器用户,调研结果与此一致,80.02%的用户将热水器用于洗漱和淋浴,其他场景为厨房用水等,晚上是热水使用最高峰期。

研究发现,一天中,用水高峰时间为早上07:00—09:00,主要进行的活动为洗脸和做饭;中午12:00较为集中,主要为做饭;晚上时间跨度较大,18:00主要为做饭,21:00淋浴时达到用热水高峰,超过83.5%的中国家庭使用淋浴方式。晚上热水的主要用途是洗脸、洗脚、洗澡和洗衣服。

### 2.2 用水温度与流量需求

为了确定用水温度和用水流量,调研了我国用户对热水的温度和流量的需求,以及现行热水器标准对热水温度和流量设置,如表1和表2所示。

从用户使用热水温度和热水流量来看,洗澡(淋浴)时水温通常为38~43  $^{\circ}\text{C}$ 适宜,普通花洒水流量在6~8 L/min,大花洒在9~12 L/min;洗脸、洗手用热水通常短暂使用,对温度敏感度较低,水温在35~40  $^{\circ}\text{C}$ ,水流量在2~4 L/min;做饭时热水通常用于厨房洗涤较多,油污清洁需要较高的温度,但长期高温会导致皮肤的损

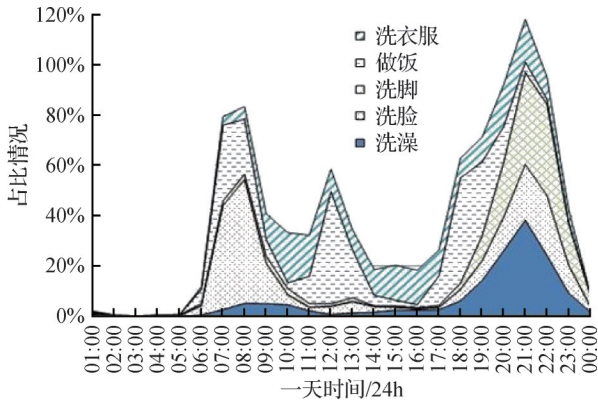


图1 中国家庭24 h热水用途分布

Fig.1 Distribution of 24-hour hot water usage in Chinese households

表1 不同用途的热水参数需求

Tab.1 Requirements for hot water parameters for different purposes

用途	温度/℃	体积流量/(L/min)
沐浴	38~43	6~12
洗漱	35~40	2~4
厨房	40~45	4~6

伤,水温通常控制在40~45℃,水流量在4~6 L/min。

从现行标准对用水温度和流量的设置来看,热泵热水器标准GB/T 23137—2020<sup>[14]</sup>热水输出率实验时,符合热水要求的最低水温为44.5℃(低于设定温度(55℃±0.5℃)10℃,水流量为5%的额定流量,但最小不低于5 L/min;GB18111—2021《燃气容积式热水器》<sup>[16]</sup>热水产率实验时,放水流量为(12±1)L/min,符合热水要求的最低温度为43℃(比最高放水温度(60℃±2℃)低15℃);GB/T 20289—2006《储水式热水器》<sup>[17]</sup>中热水输出率实验时,符合热水要求的最低水温为42℃(比设定温度(65℃±3℃)低20℃),放水流量则是按照热水器的容量来定,10 L以下储水式热水器按2 L/min;10~50 L的储水式热水器按5 L/min;50~200 L的储水式热水器按10 L/min;200 L以上的储水式热水器按照5%的额定流量。

综合考虑用户使用水温习惯,并结合热水使用时间习惯,选择40℃作为有效热水温度,洗脸、做饭时用水量按照热水流量4 L/min,而在晚间洗澡较多时,根据负荷配置不同分别给出不同的流量选择。

### 3 统一能效评价方法

#### 3.1 评价指标体系

储水式电热水器采用24 h固有能耗系数和热水输出率 $\mu$ 作为能效评价指标,其中24 h固有能耗系数

表2 不同热水器标准对水温和流量的设置要求

Tab.2 Requirements for setting water temperature and flow rate of different water heater standards

标准	温度/℃	体积流量/(L/min)
GB/T 23137—2020 <sup>[14]</sup>	44.5~45.5	5%的额定流量 (最小不低于5 L/min)
GB18111—2021 <sup>[16]</sup>	43~47	(12±1)L/min 额定容量<10 L 2 L/min 10 L≤额定容量<50 L 5 L/min
GB/T 20289—2006 <sup>[17]</sup>	42~45	50 L≤额定容量<200 L 10 L/min 额定容量>200 L 5%的额定流量

是24 h固有能耗与24 h固有能耗限定值的比值,而 $\mu$ 是实际热水输出率与额定容量的比值,所选热水器一定的情况下,其24 h固有能耗限定值和额定容量为定值,24 h固有能耗系数与热水器加热功率(电能消耗与加热所需时间的比值)以及加热水温差(水初始温度与目标温度的差)相关,而 $\mu$ 则与加热水量及加热水温差(水初始温度与目标温度的差)相关。

热泵热水器采用性能系数COP作为能效评价指标,COP为热泵制热量 $Q$ 与制热消耗功率 $P$ 的比值,总热量与加热水量、加热水温差及加热时间有关。

燃气热水器采用效率 $\eta_{\text{燃气}}$ 作为能效评价指标, $\eta_{\text{燃气}}$ 为有效利用热量占燃气完全燃烧总放热量的百分比,有效利用热量与产热量以及加热水温差(水初始温度与目标温度的差)相关。

可见无论哪种热水器,其目的均是将一定量的水从初始温度加热至目标温度,加热所需的总热量与加热水质量和加热水温差有关,只要用水量和温差相同,则总热量需求一定。热水器的加热功率等于总热量除以加热时间,即加热时间等于总加热量除以加热功率,可见功率越大加热时间越短,加热越快。但由于不同能效标准给出的能效指标不同,不便于直观对比,因此将电热水器和热泵热水器的能效计算统一为一次能源利用效率,最终统一成总供热量与消耗功率的比值。

以热水器能效实验中实测供热量与总用能的比值来评价热水器效率 $\eta$ ,以一次能源利用效率的形式表示,按式(1)计算:

$$\eta = \frac{Q_{LP}}{CC \cdot (Q_{elec} + (24 - t_{LP}) \cdot P_{es})} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $\eta$ 为热水器能效,%; $Q_{LP}$ 为特定用水模式下实测的总供热量,kW·h,按式(2)和式(3)计算; $Q_{elec}$ 为用水模式实验中供应热水期间的耗电量,kW·h; $t_{LP}$ 为用水

模式实验中供应热水的时间,  $h$ ;  $P_{es}$  为待机模式期间待机消耗功率,  $kW$ , 按式(4)计算;  $CC$  为电与热值的转换关系,  $kJ/kJ$ , 是指发一度电所消耗多少热值的一次能源, 按每年国家能源局发布的  $6\ 000\ kW$  及以上电厂供电标准煤耗数据(如 2017 年  $309\ g/(kW \cdot h)$ ), 以及标准煤热值按  $29\ 307\ kJ/kg$  换算得到, 但由于每年发布的数据略有差异, 故此处基于 2017 年发布数据给出固定值  $CC=2.52\ kJ/kJ$ 。

特定用水模式下实测的总热量  $Q_{LP}$  是特定用水模式下每次放水有效热力学能之和, 计算如下:

$$Q_{LP} = \sum_{i=1}^n Q_{tapi} \quad (2)$$

式中:  $i$  为特定用水模式下的放水次数;  $n$  为特定用水模式下的放水总次数。

特定用水模式下每次放水有效热力学能计算如下:

$$Q_{tapi} = \frac{1}{60 \times 1000 \times 3600} \int_0^{tapi} c_p \rho_i q_{vi} (T_{Hi} - T_{Ci}) dt \quad (3)$$

式中:  $Q_{tapi}$  为特定用水模式下第  $i$  次放水实测的有效热力学能,  $kW \cdot h$ ;  $t_{tapi}$  为第  $i$  次放水有效热力学能的累计测试时间,  $s$ ;  $T_{Hi}$  为第  $i$  次放水实测的出水温度,  $^{\circ}C$ ;  $T_{Ci}$  为第  $i$  次放水实测的进水温度,  $^{\circ}C$ ;  $c_p$  为水比定压热容,  $kJ/(kg \cdot ^{\circ}C)$ , 取值  $4.187\ kJ/(kg \cdot ^{\circ}C)$ ;  $\rho_i$  为热水密度,  $kg/m^3$ , 取第  $i$  次放水  $T_{Hi}$  条件下的值;  $q_{vi}$  为第  $i$  次放水实测的热水流量,  $L/min$ 。

待机模式期间消耗功率计算如下:

$$P_{es} = \frac{3600Q_{es}}{t_{es}} \quad (4)$$

式中:  $P_{es}$  为待机消耗功率,  $kW$ ;  $Q_{es}$  为测试期间的耗电量,  $kW \cdot h$ ;  $t_{es}$  为测试的时间间隔,  $s$ 。

### 3.2 测试工况设计

根据我国气候特征设定测试条件如表 3 所示。

表 3 测试工况参数

Tab.3 Test condition parameters

类型	环境温度/ $^{\circ}C$	进水温度/ $^{\circ}C$	加热温度/ $^{\circ}C$
热泵热水器	15(干球)	15	55
储水式热水器	20	15	65

### 3.3 40 $^{\circ}C$ 混合水量 ( $V_{40}$ )

$V_{40}$  实验是为了衡量储水箱的持续供热水能力, 在热水器加热至规定的温度后, 以规定水流量进行放水测试, 直至出水温度低于  $40\ ^{\circ}C$ 。数据采集间隔应不大于  $5\ s$ 。  $V_{40}$  按式(5)计算:

$$V_{40} = \frac{1}{(40 - 15) \times 60} \int_0^{t_{40}} q_v (T_H - T_C) dt \quad (5)$$

式中:  $V_{40}$  为  $40\ ^{\circ}C$  混合水量,  $L$ ;  $t_{40}$  为测试的时间间

隔,  $s$ 。

## 4 实验方案和实验流程

根据我国家庭使用热水的习惯, 制定热水器性能测试方案。总体思路是: 1) 热水器以供热水量大小进行负荷等级划分, 每个等级对应不同的用水模式, 包括水流量、有效热力学能等; 2) 不同类别热水器根据使用场景不同, 分别设置测试条件, 如进、出水温度, 环境温度; 3) 以用户实际热水的热量与满足用水需求所消耗的能量的比值(折算成一次能源利用效率)来评价能效。

下面以空气源热泵热水器(简称: 热泵热水器)和储水式电热水器这 2 类家用热水器为例, 说明二者的性能测试方案。

### 4.1 实验条件

#### 4.1.1 环境条件

对于热泵热水器, 选取南京地区全年室外气象参数的平均值, 即干/湿球温度为  $15\ ^{\circ}C/12\ ^{\circ}C$  作为全年平均运行工况参数; 对于储水式电热水器, 选取干球温度  $20\ ^{\circ}C$ 、湿球温度  $\leq 18\ ^{\circ}C$  作为室温工况参数, 兼顾与产品标准相关要求的对应性。

#### 4.1.2 进、出水温度

参考城市自来水全年平均温度, 将热泵热水器和储水式电热水器进水温度均统一设置为  $15\ ^{\circ}C$ , 在加热终止温度设定上, 充分考虑 2 种热水器的特点, 分别给出不同的加热终止温度。

对于热泵热水器, 由于其采用热泵制热, 能效相对较高, 且热泵制热效率与温差密切相关。出水温度较低时, 与环境温差较小, 热泵从环境中吸热的效率更高, 电能消耗更低, 从而实现高效运行。此外, 水温超过  $55\ ^{\circ}C$  时, 水中钙镁离子结垢速度加快, 设定为  $55\ ^{\circ}C$  可减少结垢, 延长设备寿命, 从而实现热泵热水器的长期节能运行。

对储水式电热水器, 高温加热 ( $65\ ^{\circ}C$ ) 可提升保温效果, 减少因水温下降导致的重复加热次数, 同时高温储存可抑制细菌滋生, 符合卫生要求。

#### 4.1.3 测试仪表与测试允差

测试仪器仪表主要用于对水的温度、水的流量、空气(热源)的干球和湿球温度以及电的功率、电量和电压等的计量, 仪器仪表精度和测试允差的要求基本保持与产品标准、能效标准的对应性。

### 4.2 用水模式设置

欧盟、日本、美国等国家基于“24 h 用水实验”测试动态能效, 注重的是对各项实际用水过程的模拟

还原。测试方法的关键是科学确定用水模式,既要保证用水模式科学性、代表性,又要保证测试过程的简洁性、可操作性,适当控制测试设备、时间和能源成本。本研究结合中国人的用水习惯和规律,在欧盟放水模式基础上进行了简化,设定如下用水模式:

#### 1) 40 °C混合水量( $V_{40}$ )。

考虑我国居民用水习惯中盆浴较少,将用水温度统一为40 °C,即要求在测试期间有效水温 $\geq 40$  °C。 $V_{40}$ 的定义:在规定的测试条件下,热水器能提供40 °C水温的水量。

#### 2) 负荷等级。

负荷等级结合我国热水器能提供的40 °C混合水量范围来确定,从XS~4XL共分成8个等级,如表4所示。XS和S等级主要对应小厨宝;M、L和XL等级主要对应一般家用热水器,其中M适用于1~2口之家,L适用于2~3口之家,XL适用于3~4口以上家庭;XXL~4XL等级主要对应大户型或小商用情景,通常适用于5口及以上家庭。与欧盟测试方法相比,减少了2个小的负荷等级3XS和XXS。

#### 3) 不同负荷用水模式设置。

不同负荷下水模式设计如表5所示。有效水温、有效水流量、有效热力学能为实验重要参数。“有效水温”定义为在用水模式下水时,对有效热力学

表4 不同标称负荷等级热水器的 $V_{40}$ 要求  
Tab.4  $V_{40}$  requirements for water heaters with different nominal load levels

标称负荷等级	$V_{40}$ 要求
XS	8 L < $V_{40}$ $\leq$ 16 L
S	16 L < $V_{40}$ $\leq$ 65 L
M	65 L < $V_{40}$ $\leq$ 100 L
L	100 L < $V_{40}$ $\leq$ 150 L
XL	150 L < $V_{40}$ $\leq$ 210 L
XXL	210 L < $V_{40}$ $\leq$ 300 L
3XL	300 L < $V_{40}$ $\leq$ 520 L
4XL	$V_{40} \geq 520$ L

能有贡献的最低水温。“有效水流量”定义为在用水模式下水时,对有效热力学能有贡献的热水最小流量。“有效热力学能”定义为在不低于有效水温和有效水流量时所产生的热水热力学能。测试时,对于特定时刻的用水,当有效水温和有效水流量均达到最低要求后,才开始计入有效热力学能。

用水的假设时刻为07:00、12:00、18:00和21:00。前3个时刻的有效水流量为4 L/min,主要用于洗脸、洗手和做饭;考虑到中国人大多习惯于晚间洗浴,故21:00的有效水流量设定为10 L/min;对于标称负荷等级为3XL和4XL的热水器,因其大容量的特性,有效水流量分别设定为16 L/min和48 L/min。

表5 热水器统一测试用水模式

Tab.5 Unified test water usage mode for water heater

假设时刻	有效水温/°C	有效水流量/ (L/min)	有效热力学能/(kW·h)							
			XS	S	M	L	XL	XXL	3XL	4XL
07:00	$\geq 40$	4	0.14	0.63	1.16	1.16	1.16	1.37	1.37	9.24
12:00	$\geq 40$	4	0.11	0.32	0.63	0.63	0.63	1.37	1.37	5.04
18:00	$\geq 40$	4	0.11	1.16	1.26	1.26	1.26	1.26	1.26	9.24
		10	—	—	1.90	3.80	5.70	7.70	—	—
21:00	$\geq 40$	16	—	—	—	—	—	—	11.50	—
		48	—	—	—	—	—	—	—	19.00
总有效热力学能			0.35	2.10	4.95	6.85	8.75	11.70	15.49	42.52

注:“—”表示不适用。

## 4.3 实验过程

### 4.3.1 实验周期和实验步骤

实验周期包括4个阶段,如图2所示,即加热、待机消耗功率实验、用水模式实验、 $V_{40}$ 实验。

### 4.3.2 实验过程

#### 1) 加热。

按照进出水温度设置进行加热直至达到规定温度,关闭热水器设定的其他参数和功能。

#### 2) 待机消耗功率实验。

带储水箱的热水器存在待机消耗功率。待机功率是从热水器将水加热至设定水温开始,热水器维持自然保温待机状态,直至水温低于设定值再次启动这一期间消耗的功率。

#### 3) 用水模式实验。

用水模式实验是体现热水器能效的主要测试阶段,在待机消耗功率实验结束时开始测试,以此为假

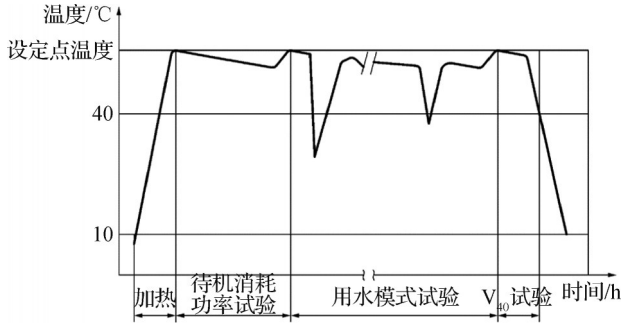


图2 实验周期  
Fig.2 Test cycle

设时刻07:00,按照表2规定的用水模式供应热水,最后一次放水完成时测试结束。数据采集间隔应不大于5 s,每次放水的有效热力学能测量值应在表2规定的有效热力学能参考值的±5%范围内。

4) 热水器能效计算。

以热水器能效实验中实测供热量与总用能的比值

来评价热水器效率 $\eta$ ,以一次能源利用效率的形式表示。

5)  $V_{40}$ 实验。

$V_{40}$ 实验是为了衡量储水箱的持续供热水能力,在热水器加热至规定的温度后,以规定水流量进行放水测试,直至出水温度低于40 °C。数据采集间隔应不大于5 s。

5 实验验证方案及结果分析

5.1 实验验证方案

5.1.1 样机选择

对热泵热水器,选择市场主流150 L和200 L水箱,能效1、2和3级的产品作为被测试样机,并为保证样机代表性,增加小水量80 L热泵热水器1台。对储水式电热水器,选择市场主流60 L和80 L水箱,能效1、2和3级的产品作为储水式电热水器测试样机。样机参数如表6所示。

表6 热水器测试样机参数

Tab.6 Parameters of water heater test prototype

热泵热水器				储水式电热水器				
样机编号	水箱容积/L	标称能效等级	COP	样机编号	水箱容积/L	标称能效等级	24 h固有能效系数	热水输出率
1#	80	—	3.55	1#	60	1	0.6	80
2#	150	1	4.22	2#	60	1	0.6	80
3#	150	1	4.25	3#	60	1	0.6	85
4#	200	1	4.20	4#	80	1	0.6	70
5#	150	2	4.06	5#	80	1	0.6	80
6#	150	2	4.10	6#	60	2	0.7	75
7#	200	2	4.07	7#	60	2	0.7	80
8#	200	3	3.80	8#	80	2	0.7	80
9#	200	3	3.94	9#	80	2	0.7	80
10#	200	3	3.87	10#	80	2	0.7	80
11#	200	3	3.80	11#	60	3	0.8	70
12#	200	3	3.80	12#	80	3	0.8	70

5.1.2 验证过程

验证分为2个阶段,如图3所示。因目前国内热泵热水器和电热水器均没有标称负荷等级,阶段1先进行加热及待机功率实验,并进行放水,确定 $V_{40}$ ,并据此选择负荷等级。随后再进行阶段2的加热、待机功率、用水模式以及 $V_{40}$ 测试。阶段2的测试结果用于最终热水器的能效及性能参数的评价。

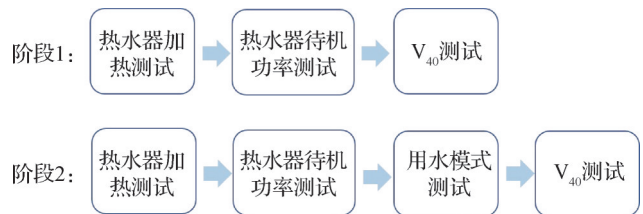


图3 热泵热水器和储水式电热水器的能效验证过程

Fig.3 Energy efficiency verification process for heat pump water heater and storage electric water heater

5.2 实验验证结果分析

5.2.1 实验验证结果

热泵热水器的测试结果如表7所示,储水式电热水器的测试结果如表8所示。

1) 不同热水器能效测试结果对比。

如图4所示,热泵热水器一次能源效率为67.7%~99.2%(均值为85.6%),显著高于储水式电热水器的

表7 热泵热水器样机测试结果  
Tab.7 Test results of prototype of heat pump water heater

样机 编号	水箱体积/L	标称 能效等级	待机功率/ kW	用水模式			$V_{40}/L$	标称负荷 等级	COP	一次能源 利用效率/%
				耗电量 $Q_{elec}/(kW \cdot h)$	供热量 $Q_{Lr}/(kW \cdot h)$	放水时 长/h				
1#	80	—	0.104	用水模式第4阶段无法结束 <sup>①</sup>			71	M	3.55	—
2#	150	1	0.058	2.509	6.832	14.24	125	L	4.22	99.2
3#	150	1	0.064	2.684	6.848	14.27	123	L	4.25	92.7
4#	200	1	0.122	3.95	8.751	16.37	208	XL	4.20	80.4
5#	150	2	0.073	3.123	6.849	14.37	148	L	4.06	79.9
6#	150	2	0.106	3.195	6.848	15.64	159	XL	4.10	76.6
7#	200	2	0.091	用水模式第4阶段无法结束 <sup>[注2]</sup>			209	XL	4.07	—
8#	200	3	0.079	3.664	8.752	15.12	203	XL	3.80	88.1
9#	200	3	0.096	3.947	8.746	14.98	208	XL	3.94	80.9
10#	200	3	0.106	4.764	8.753	15.28	206	XL	3.87	67.7
11#	200	3	0.079	用水模式第4阶段无法结束			212	XL	3.80	—
12#	200	3	0.073	用水模式第4阶段无法结束			223	XXL	3.80	—

①“用水模式第4阶段无法结束”原因:1)水箱有效热力学能不足:热泵热水器在第3次放水后,电加热未及时启动,导致第4次放水时水温低于40℃阈值;2)参数设定冲突:部分样机(如标称负荷等级L级)的 $V_{40}$ 理论值(100 L)对应的有效热力学能(3.5 kW·h)低于测试设定值(3.8 kW·h),需调整负荷等级划分或放水时序。

表8 储水式电热水器样机测试结果  
Tab.8 Test results of prototype of storage type electric water heater

样机	容积/L	能效等级	待机功率/ kW	用水模式			$V_{40}/L$	标称负荷 等级	一次能源 利用效率/%
				耗电量 $Q_{elec}/(kW \cdot h)$	供热量 $Q_{Lr}/(kW \cdot h)$	放水时长/h			
1#	60	1	0.137	5.051	4.965	13.05	98.8	M	34.9
2#	60	1	0.161	5.033	4.950	13.05	97.4	M	34.3
3#	60	1	0.158	5.071	4.951	13.07	99.0	M	34.2
4#	80	1	0.114	7.065	6.933	13.10	148.5	L	36.4
5#	80	1	0.219	7.136	6.861	13.11	142.5	L	32.5
6#	60	2	0.204	5.041	4.955	13.06	87.0	M	33.2
7#	60	2	0.218	5.139	5.004	13.03	83.3	M	32.6
8#	80	2	0.137	7.103	6.896	13.10	140.7	L	35.6
9#	80	2	0.243	7.158	6.871	13.13	141.4	L	33.2
10#	80	2	0.330	7.135	6.911	13.12	139.2	L	32.0
11#	60	3	0.161	5.081	4.962	13.05	94.6	M	34.1
12#	80	3	0.289	7.399	6.869	13.10	130.8	L	31.5

31.5%~36.4%(均值为33.8%)。使用热泵放大能效的热泵热水器整体效率较高,储水式电热水器能效整体偏低,与2种热水器实际耗能情况相符。采用基于“24 h用水模式”的全天制热水效率来统一测评热泵和储水式电热水器能效总体可行,测试结果具有较好区分度,分布区间和规律合理,能较好支撑不同种类热水器横向对比。

2) 不同热水器 $V_{40}$ 水量测试结果对比。

由图5可知,统一采用40℃混合水测试方法后,实际制热水能力与额定容量有很好的—致性,容量越大可产生的40℃混合水量越大,测试结果区分度较强,能够体现实际产品的性能特征,比热泵热水器采用制热水能力和储水式电热水器采用热水输出率更为直观地体现出热水器可以给消费者提供的热水水量。

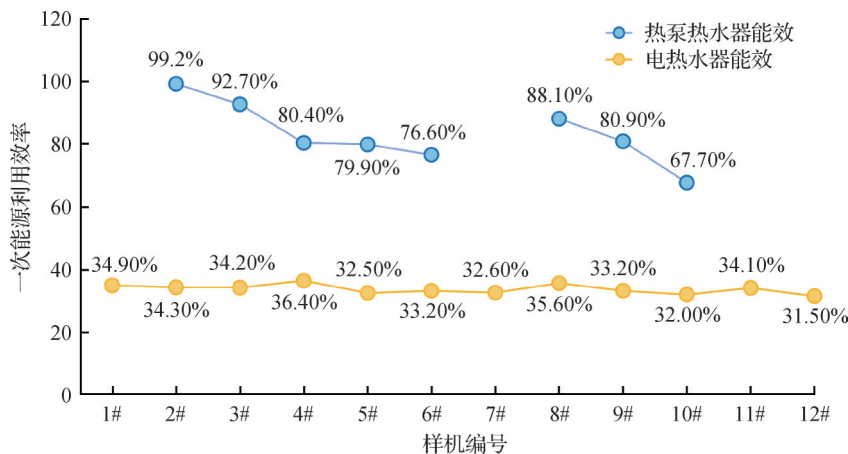


图4 热泵热水器和储水式电热水器能源效率对比

Fig.4 Comparison of energy efficiency between heat pump water heater and storage electric water heater

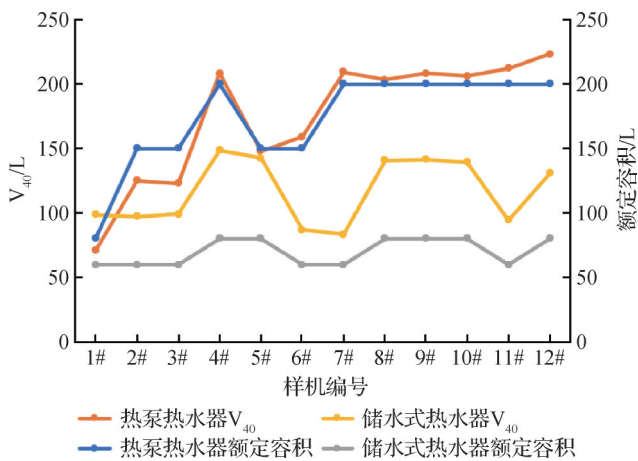


图5 热泵热水器和储水式电热水器制热水能力对比

Fig.5 Comparison of heating capacity between heat pump water heater and storage electric water heater

3) 不同热水器待机功率测试结果对比。

由图6可知,热泵热水器和储水式电热水器待机功率测试结果对比鲜明,热泵热水器待机功率普遍低于储水式热水器的待机功率,结果与2种热水器的实际特征相符。但并非标称能效等级越好,待机功率越低。如热泵热水器产品,待机功率最低的是1级能效的2#样机,但待机功率最大的4#样机能效也是1级。对储水式电热水器,待机功率最小的是能效等级为1级的4#样机,但待机功率最大的样机能效并不是3级,而是能效2级的10#样机,可见,热水器已有的能效考核方式并不能真实反映热水器各种运行状态下的能效水平,引入待机功率的评价很有必要。

4) 现行能效评价方法与新能效评价方法的对比。

由表9可知,对热泵热水器产品,2#和3#这2台样机容积、等级一致,COP相近,且3#COP略高于2#,但按照一次能源利用效率( $\eta$ )2#(99.20%)高于3#

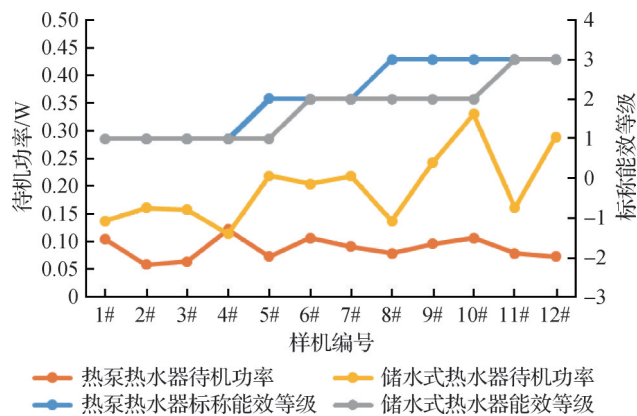


图6 热泵热水器和储水式电热水器待机功率对比

Fig.6 Comparison of standby power between heat pump water heater and storage electric water heater

(92.70%)。对比发现,由于2#待机功率和放水模式耗电量均低于3#样机,使2#样机 $\eta$ 更好;5#和6#样机容积和能效等级一致,6#的COP高于5#,但 $\eta$ 却较5#低。分析发现,6#的待机功率远高于5#,且放水模式耗电量也较5#高,高待机功率以及高放水模式耗电量导致其 $\eta$ 偏低;同样是150 L容积,不同等级产品之间,能效等级1级产品的 $\eta$ 整体高于能效等级2级的产品。

8#、9#、10#这3台样机具有相同的容积(200 L)和相同的等级(3级),8#样机由于待机功率和用水模式耗电量均低于9#和10#样机,使其COP虽然不是3台中最优的,但 $\eta$ 却是3台中最好的。10#样机由于待机功率和用水模式耗电量均较高,因此其 $\eta$ 在3台样机中最差。9#样机COP最好,但由于其待机功率和耗电量较高,导致其 $\eta$ 较差。将1级能效的4#样机与上述3台样机对比发现,由于8#样机的待机功率和耗电量优势显著,使其能效等级虽低,但 $\eta$ 却较好;9#样机由于待机功率较4#样机降低21.3%,用水模式耗电量略优于4#样机,使其 $\eta$ 略优于4#样机,用能效

等级和COP却不能反映其优势;10#样机在待机功率上虽然优于4#样机(低13.1%),但其用水模式耗电量却较4#样机高20.6%,高耗电量抵消了待机功率

的优势,使 $\eta$ 降低。可见,对于热泵热水器,采用本文给出的能效评价方法比现行标准的COP更能全面反映热泵热水器的能效水平。

表9 热泵热水器待机功率、用水模式耗电量、性能系数及能源效率对比

Tab.9 Comparison of standby power, water usage mode power consumption, performance coefficient, and energy efficiency of heat pump water heaters

容积/L	样机及等级	待机功率/kW	用水模式耗电量/(kW·h)	性能系数	一次能源利用效率/%
150	样机2#(1级)	0.058	2.509	4.22	99.20
	样机3#(1级)	0.064	2.684	4.25	92.70
150	样机5#(2级)	0.073	3.123	4.06	79.90
	样机6#(2级)	0.106	3.195	4.10	76.60
200	样机4#(1级)	0.122	3.950	4.20	80.40
	样机8#(3级)	0.079	3.664	3.80	88.10
200	样机9#(3级)	0.096	3.947	3.94	80.90
	样机10#(3级)	0.106	4.764	3.87	67.70

由表10可知,对储水式热水器产品,4#和5#样机按照现行能效标准均为1级能效,且容积相同(80 L)但按照 $\eta$ 排序,差距却较大。究其原因,在待机功率上,5#样机是4#的近2倍,5#用水模式的耗电量也高于4#,双重影响导致 $\eta$ 降低;对8#和10#样机,均为80 L、能效2级的产品,但 $\eta$ 分别为35.60%和32.00%。分析发现,10#待机功率是8#的2.4倍,且用水模式下耗电量10#也略高于8#,这主要是由于待机功率过高导致 $\eta$ 降低;对6#、7#和11#样机,能效等级分别是2、2、3,容积均为60 L,分析发现6#和7#待机功率均高于11#,7#用水模式下耗电量高于11#。

7#由于待机功率和用水模式耗电量均高于11#,双重影响导致其能效等级虽然高于11#,但 $\eta$ 却较11#差,而6#样机则是由于高待机功率导致其 $\eta$ 较11#差。可见对于储水式电热水器,待机功率是影响 $\eta$ 的核心因素,相同能效等级产品在用水模式下耗电量差异较小时,对 $\eta$ 影响较小,但若叠加待机功率的影响则会加大对 $\eta$ 的影响。可见,仅通过现行的能效等级考核储水式热水器的能效水平并不全面,本文给出的 $\eta$ 评价方法因为综合考虑了待机功率和用水模式下能耗的影响,更能反映热水器真实的能效水平。

表10 储水式热水器待机功率、用水模式耗电量及一次能源利用效率对比

Tab.10 Comparison of standby power, water usage mode power consumption, and primary energy utilization

容积/L	样机及等级	待机功率/kW	用水模式耗电量/(kW·h)	一次能源利用效率/%
80	样机4#(1级)	0.114	7.065	36.40
	样机5#(1级)	0.219	7.136	32.50
80	样机8#(2级)	0.137	7.103	35.60
	样机10#(2级)	0.330	7.135	32.00
60	样机6#(2级)	0.204	5.041	33.20
	样机7#(2级)	0.218	5.139	32.60
	样机11#(3级)	0.161	5.081	34.10

### 5.2.2 存在不足和改进建议

1)放水时间和次数及部分有效热力学能设置不合理。

部分热泵热水器在用水模式测试时,第4阶段的放水测试无法结束,经分析存在以下2个原因:一是

第4次放水与第3次放水之间电加热未开启,导致水箱本身有效热力学能不足,使第4次放水无法结束,如图7所示。二是第4次放水有效热力学能设定值非常接近甚至大于 $V_{40}$ 最小值计算出的理论有效热力学能(L以上级别存在此现象)。因此当 $V_{40}$ 非常接近临界

最小值时,第4次放水无法结束的现象极易发生。

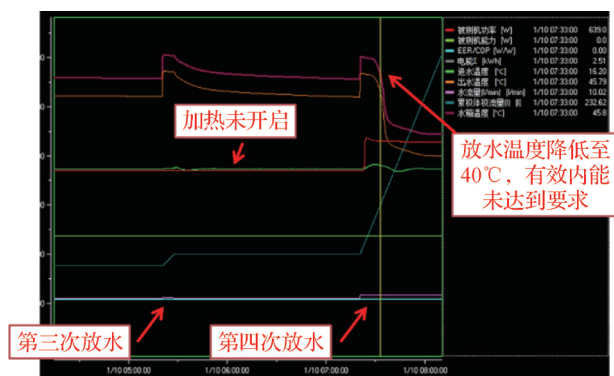


图7 热泵热水器用水模式测试

Fig.7 Water mode test for heat pump water heater

为提高能效测评方法的科学性,需要对用水模式中放水时间分配、有效热力学能与 $V_{40}$ 负荷等级进行重新修正。2个可能的改进方案如下:

(1)用水模式中重新选择放水时间,增加放水次数,将最后一次用水进行拆分,降低有效热力学能设定值,使其低于基于 $V_{40}$ 计算的理论热力学能值。如:标称负荷等级L级在用水模式中有有效热力学能设定值为 $3.800 \text{ kW}\cdot\text{h}$ ,时间为20:00,而理论计算结果显示 $V_{40}$ 为100 L时可放出的有效热力学能约为 $3.5 \text{ kW}\cdot\text{h}$ ,略低于有效热力学能设定值,因此可以降低20:00的有效热力学能设定值,使其低于 $3.5 \text{ kW}\cdot\text{h}$ ,并将降低的部分增加在其他时间段中,或增加一个放水时间点。

(2)将标称负荷等级对应的 $V_{40}$ 提高。如:标称负荷等级L级对应 $V_{40}$ 范围为100~150 L,可将100 L提高至120 L。

2)未统一不同热水器测试工况,未探索多工况下综合评价。

本研究为了与现行能效测评体系有更好的可比性,将环境温湿度工况、出水水温等与现行能效标准保持一致,未考虑不同产品受环境温湿度、出水温度影响导致的能效和性能指标的差异。热泵热水器多为压缩式制冷产品,其运行效率受环境工况影响较大,未结合全年动态气象参数进行多工况下综合制热水效率或不同区域下的制热水效率等能效评价指标的研究。

## 6 结论及建议

### 6.1 基于24 h用水模式能效测试方法的研究及验证结论

1)采用本文给出的一次能源效率方法来评价不

同类型热水器性能较现行标准的评价方法更能体现产品在不同运行状态下的综合能效水平,且可实现不同类型产品的横向对比,采用一次能源效率作为热水器的统一评价指标是热水器能效评价的发展方向。

2)根据我国的用水习惯,负载等级M、L、XL是我国最典型的3种用水模式,根据《2020年第七次全国人口普查数据》,我国1~4口家庭占比为89.7%(国家统计局,2020)<sup>[16]</sup>,对应M(1~2口)、L(2~3口)、XL(3~4口)3种负荷等级,对应的家庭占比(如M占35%、L占40%、XL占15%),覆盖90%以上家庭需求。使用有效热水温度 $40 \text{ }^\circ\text{C}$ 作为有效热水的最低温度,用 $V_{40}$ 来衡量热水器的热水输出能力更能直观反映热水器的制热水能力。

3)采用本文给出的24 h用水模式测试方法,分别在07:00、12:00、18:00、21:00进行放水模式,初始水温为 $15 \text{ }^\circ\text{C}$ ,热泵热水器的加热终止温度设定为 $55 \text{ }^\circ\text{C}$ ,储水式电热水器的加热终止温度设定为 $65 \text{ }^\circ\text{C}$ ,在表2所示的各负荷等级下对应的流量进行实验,并将 $40 \text{ }^\circ\text{C}$ 作为有效热水的温度下限,通过比对测量结果,验证了方法的一致性和可重复性,为热水器能效标准的制定奠定基础。

### 6.2 燃气热水器纳入统一评价体系的技术挑战

虽然热泵与电热水器的统一能效评价体系已取得进展,但燃气热水器的纳入仍面临以下关键技术难点:

#### 6.2.1 燃料类型与热值差异

我国燃气热水器主要使用天然气、液化石油气(liquefied petroleum gas, LPG)等多种气源,其低位热值差异显著(如天然气 $\approx 36 \text{ MJ}/\text{m}^3$ ,LPG $\approx 93 \text{ MJ}/\text{m}^3$ ),直接导致能源输入量计算的复杂性。现行能效标准GB 20665—2015<sup>[17]</sup>虽以天然气为基准,但未明确多气源折算方法,难以实现跨燃料类型的公平对比。此外,生物燃气等新型燃料的引入进一步加剧了热值修正的难度。

#### 6.2.2 瞬态热效率波动特性

燃气燃烧效率受水流量、温升幅度及负荷切换影响显著。实验表明,在动态用水模式下,燃气热水器的瞬时热效率波动范围可达70%~95%,而现行稳态测试方法(如GB 20665—2015)仅考核满负荷工况,无法反映实际能效。

#### 6.2.3 排放因子与环保约束

燃气热水器的氮氧化物( $\text{NO}_x$ )与一氧化碳( $\text{CO}$ )

排放水平直接影响其环境效益。现行标准仅对NO<sub>x</sub>排放设限( $\leq 70 \text{ mg}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ ),但缺乏与能效指标的协同评价。

#### 6.2.4 动态测试模式适配性不足

燃气热水器为即热式设备,其供水能力与储水式热水器的容量导向评价模式存在本质差异。测试中发现,XXL负荷模式下燃气热水器需降低流量(如6 L/min)以满足温升要求,与储水式热水器的用水模式参数(10 L/min)不匹配,导致能效横向对比失真。

### 6.3 未来研究方向

#### 6.3.1 燃料热值动态修正技术

开发基于气源成分在线检测的热值自适应算法,结合T/CECA-G 0155—2023的多能源互补框架,构建天然气、LPG及生物燃气的统一热值修正系数库,减少能源类型差异对评价结果的影响。

#### 6.3.2 高精度瞬态热效率测试方法

利用多工况耦合平台,集成微流量传感器(精度: $\pm 0.1 \text{ L}/\text{min}$ )与红外热成像技术,实时捕捉燃烧效率波动,并设计基于PID控制的动态流量调节算法,提升测试工况的稳定性与重复性。

#### 6.3.3 气候分区与多目标优化

针对我国南北气候差异,参考GB 55015—2021<sup>[18]</sup>的建筑节能分区要求,建立低温( $-15 \text{ }^\circ\text{C}$ )、常温( $15 \text{ }^\circ\text{C}$ )及高温( $35 \text{ }^\circ\text{C}$ )3档测试工况,研究燃气热水器在不同环境温度下的能效衰减规律,制定区域适应性评价指标。

#### 6.3.4 能效-排放协同评价体系

扩展刘振宇<sup>[12]</sup>的碳排放模型,引入NO<sub>x</sub>/CO排放权重因子,构建“一次能源利用率-排放强度”双维度评价矩阵,推动燃气热水器向高能效、低污染方向升级。

#### 6.3.5 即热式设备用水模式重构

基于市场调研数据,重新定义燃气热水器的负荷等级划分标准,将产热水能力(如16 L/min)与动态用水需求(如淋浴峰值流量为12 L/min)直接关联,制定独立于储水式产品的测试模式,提升评价体系的科学性与公平性。

### 6.4 总结与创新点

1) 本文提出基于一次能源效率的统一评价指标,在动态用水模式下,热泵热水器效率较现行标准提升15%~20%。

2) 构建了本土化动态用水模式,覆盖90%家庭需求。

3) 实验验证误差率低于5%,方法重复性良好。

本文受中国标准化研究院院长基金重大项目“基于行为分析的典型家电绿色性能测评和智慧监管关键技术研究”(542023Y-10358)项目资助。(The project was supported by the Major Project of the President's Fund of China National Institute of Standardization "Research on Key Technologies of Green Performance Evaluation and Intelligent Supervision for Typical Household Appliances Based on Behavioral Analysis" (No. 542023Y-10358).)

#### 参考文献

- [1] 热泵热水机(器)能效限定值及能效等级:GB 29541—2013[S].北京:中国标准出版社,2013.(Minimum allowable values of the energy efficiency and energy efficiency grades for heat pump water heaters:GB 29541—2013[S].Beijing:Standards Press of China,2013.)
- [2] 储水式电热水器能效限定值及能效等级:GB 21519—2008[S].北京:中国标准出版社,2008.(Minimum allowable values of energy efficiency and energy efficiency grades for electrical storage water heaters:GB 21519—2008[S].Beijing:Standards Press of China,2008.)
- [3] Energy labelling of water heaters, hot water storage tanks and packages of water heater and solar device:(EU) No.812/2013—2013[S].Brussels:the European Parliament and of the Council,2013.
- [4] Ecodesign requirements for water heaters and hot water storage tanks:(EU) No.814/2013[S].Brussels:the European Parliament and of the Council,2013.
- [5] Heat pumps with electrically driven compressors—Testing, performance rating and requirements for marking of domestic hot water units:EN 16147:2017[S].Brussels:European Committee for Standardization,2017.
- [6] Performance rating of commercial heat pump water heaters:AHRI 1301:2013[S].Brussels:American Society of Air Conditioning and Refrigeration,2013.
- [7] 王荣.中国家用热水设备典型用水模式研究[D].北京:北京建筑大学,2013.(WANG Rong.Study on typical water usage patterns of domestic hot water equipment in China[D].Beijing:Beijing University of Civil Engineering and Architecture,2013.)
- [8] 周晋,尹小平,徐峰.基于群体特征的高校生活热水使用行为仿真[J].系统仿真学报,2019,31(1):145-150.(ZHOU Jin, YIN Xiaoping, XU Feng. Simulation of domestic hot water using behavior of college students based on group characteristics [J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(1): 145-150.)
- [9] 田帅.考虑用户行为的太阳能热水系统优化方法研究[D].南京:东南大学,2022.(TIAN Shuai. Study on

- optimization method of solar hot water system considering occupant behavior [D]. Nanjing: Southeast University, 2022.)
- [10] 田东东, 张勇, 代学冬. 基于用户使用电热水器行为习惯的用水时段划分方法[J]. 内蒙古科技大学学报, 2024, 43 (3): 295-300. (TIAN Dongdong, ZHANG Yong, DAI Xuedong. A method of dividing water use periods according to users' behavioral habits of using electric water heaters [J]. Journal of Inner Mongolia University of Science and Technology, 2024, 43 (3): 295-300.)
- [11] 智能储水式电热水器能效评价规范: T/CAS 309-2018 [S]. 北京: 中国标准化协会, 2018. (Dynamic energy efficiency test method for household water heaters: T/CAS 309-2018 [S]. Beijing: China Association for Standardization, 2018.)
- [12] 刘振宇. 制冷行业碳排放模型的动态仿真研究[C]// 中国制冷学会学术年会论文集. 杭州: 2021: 102-108. (LIU Zhengyu. Dynamic simulation research on carbon emission model in refrigeration industry [C]// Proceedings of the Annual Conference of Chinese Association of Refrigeration. Hangzhou: Chinese Association of Refrigeration. Hangzhou, 2021: 102-108.)
- [13] 制冷设备能效评价规范: T/CECA-G 0155-2023 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2023. (Energy efficiency evaluation specification for refrigeration equipment: T/CECA-G 0155-2023 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2023.)
- [14] 家用和类似用途热泵热水器: GB/T 23137-2020 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2020. (Heat pump water heater for household and similar application: GB/T 23137-2020 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2020.)
- [15] 家用和类似用途热水器能效测试计算方法: T/CECA-G 0022-2019 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2019 (Calculation method for energy efficiency test of household and similar water heaters: T/CECA-G 0022-2019 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2019.)
- [16] 燃气容积式热水器: GB 18111-2021 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2021. (Gas storage water heater: GB 18111-2021 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2021.)
- [17] 储水式热水器: GB/T 20289-2006 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2006. (Electrical storage water heaters: GB/T 20289-2006 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2006.)
- [18] 国家统计局. 第七次全国人口普查公报(1号) [R]. 北京: 中国统计出版社, 2021. (National Bureau of Statistics. The seventh national population census bulletin (No. 1) [R]. Beijing: China Statistics Press, 2021.)
- [19] 家用燃气快速热水器和燃气采暖热水炉能效限定值及能效等级: GB 20665-2015 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2015. (Minimum allowable values of energy efficiency and energy efficiency grades for domestic gas instantaneous water heaters and gas fired heating and hot water combi-boilers: GB 20665-2015 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2015.)
- [20] 建筑节能与可再生能源利用通用规范: GB 55015-2021 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021. (General code for energy efficiency and renewable energy application in buildings: GB 55015-2021 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2021.)

#### 通信作者简介

陈海红, 女, 研究员, 中国标准化研究院, 15510352192, E-mail: chenhh@cnis.ac.cn。研究方向: 用能产品设备能效检测及技术标准化。

#### About the corresponding author

Chen Haihong, female, researcher, China National Institute of Standardization, 86-15510352192, E-mail: chenhh@cnis.ac.cn. Research fields: energy efficiency testing technology and standardization for energy-consuming product equipment.