

文章编号: 1671-6612 (2025) 04-549-08

# 变频热泵型房间 空调器各冷量及消耗功率对 APF 的影响分析

阳光灿 钟 玲 唐 明 刘必圆 冯文雅 张 豪

(重庆仕益产品质量检测有限责任公司 重庆 401120)

**【摘 要】** 基于 GB 21455-2019《房间空气调节器能效限定值及能效等级》中全年能源消耗效率 (Annual Performance Factor, *APF*) 的计算方法, 研究了变频热泵型房间空调器各冷量及功率消耗对 *APF* 的影响机制。结果发现额定制冷量、额定中间制冷量及消耗功率、额定低温制冷量及消耗功率、25%额定制冷量及消耗功率对 *APF* 的影响存在与节能评价目标相悖的情形, 为改进 *APF* 计算提供了参考。通过线性回归定量分析了各能力对 *APF* 的影响程度, 指出了提高 *APF* 的科学途径。

**【关键词】** 变频热泵型空调器; 冷量及消耗功率; 全年能源消耗效率; GB 21455-2019

中图分类号 TB657.2 文献标志码 A

## Analysis of Influence of Cooling Capacity and Consumption Power of Variable Frequency Heat Pump Room Air Conditioner on *APF*

Yang Guangcan Zhong Ling Tang Ming Liu Biyuan Feng Wenya Zhang Hao

(Chongqing SIIE Quality Testing Co., Ltd. Chongqing, 401120)

**【Abstract】** Based on the calculation method of Annual Performance Factor (*APF*) in GB 21455-2019 "Minimum allowable values of the energy efficiency and energy efficiency grades for room air conditioners", the influence mechanism of various cooling capacities and power consumption of variable frequency heat pump type room air conditioners on *APF* was studied. It was found that the influence of the rated cooling capacity, the rated intermediate cooling capacity and power consumption, the rated low-temperature cooling capacity and power consumption, and 25% of the rated cooling capacity and power consumption on the *APF* was contrary to the energy-saving evaluation target, providing a reference for improving the calculation of the *APF*. The influence degree of each ability on *APF* is quantitatively analyzed by linear regression, and the scientific way to improve *APF* is pointed out.

**【Keywords】** Variable speed heat pump type room air conditioner; Cooling capacity and consumption power; Annual performance factor; GB 21455-2019

## 0 引言

GB 21455-2019 规定了房间空调器的能效限定值及等级, 促进了节能技术的研发应用、节能产品的生产消费<sup>[1,2]</sup>。对热泵型空调, 标准要求全年能

源消耗效率 (Annual Performance Factor, *APF*) 不小于对应能效等级的标准规定值, 如表 1 所示, 且不小于产品标示值的 95%。

表 1 热泵型房间空气调节器能效等级指标值 (APF)

Table 1 Energy efficiency grade index value (APF) of heat pump type room air conditioner

| 额定制冷量/[ (CC)/W]        | 能效等级 |      |      |      |      |
|------------------------|------|------|------|------|------|
|                        | 1 级  | 2 级  | 3 级  | 4 级  | 5 级  |
| $CC \leq 4500$         | 5.00 | 4.50 | 4.00 | 3.50 | 3.30 |
| $4500 < CC \leq 7100$  | 4.50 | 4.00 | 3.50 | 3.30 | 3.20 |
| $7100 < CC \leq 14000$ | 4.20 | 3.70 | 3.30 | 3.20 | 3.10 |

基于 GB 21455 的 APF 计算方法, 张海云<sup>[3]</sup>分析了 5 个能力及对应的消耗功率对 APF 的影响; 杨晓<sup>[4]</sup>通过分析 APF 计算方法, 研究各变量对 APF 的影响规律, 指出建立房间热负荷和冷负荷时应该相互独立, 即保证 SEER 和 HSPF 互不影响, 还提出考虑电加热效率; 针对 APF 计算的复杂性, 陈炫丞<sup>[5]</sup>、沈佳敏<sup>[6]</sup>还研究了 APF 的快速计算方法; 曹晨<sup>[7]</sup>分析并建议 APF 按地域差异进行考核; 吴阿明<sup>[8]</sup>分析了低温制冷实测法和计算法的区别及其对 APF 的影响, 建议变频机用实测法, 定频机用计算法<sup>[9]</sup>; 陈炫丞<sup>[10]</sup>通过计算分析, 提出低温中间制冷的取值可通过算法取得; 王鲁平<sup>[11]</sup>设计了一个 5 工况法来计算制冷季节能源消耗效率 (Seasonal Energy Efficiency Ratio, SEER); 尚凯锋<sup>[12]</sup>对 5 工况法和 7 工况法进行回归分析得到各能力提升 APF 的权重分布, 发现采用 7 工况法时, APF 随中间制冷消耗功率的增加而增加, 指出 APF 计算方法存在漏洞; 低温制冷采用实测法能显著提高 APF<sup>[13]</sup>。蔡宁<sup>[14]</sup>指出对于低温制冷不同转速下的取值, 需都采用实测值且按要求进行申明<sup>[15]</sup>。综上, 不管低温制冷采用实测还是计算方法, APF 计算方法都存在缺陷。实际中低温制冷一般采用实测, 但缺乏各机型各能力对 APF 影响机制的系统性分析。

本文基于 GB 21455-2019 的 APF 计算方法, 旨在研究变频热泵型房间空调器各能力对 APF 的影响, 为提高 APF 及其计算优化提供参考。首先介绍了 APF 的计算模型, 并收集了各机型空调的技术参数, 其中包括低温制冷工况对应的技术参数。然后讨论 APF 随各能力变化的变化趋势, 分析了有悖于节能评价的情形, 以及各能力与 APF 之间的线性关系。

## 1 APF 计算方法

### 1.1 APF 计算方法简介

根据 GB 21455, APF 为季节换热量与季节耗电量之比, 如式 (1) 所示。

$$APF = \frac{CSTL + HSTL}{CSTE + HSTE} \quad (1)$$

式中: CSTL 为季节制冷量; HSTL 为季节制热量; CSTE 为制冷季节耗电量; HSTE 为制热季节耗电量。

CSTL 的计算如式 (2) 所示, 当房间热负荷  $L_c(t_j) \leq$  空调运行的制冷量  $\phi_{ful}(t_j)$  时, 制冷量采用  $L_c(t_j)$  计算,  $j=1, 2, \dots, P-1, P$ ; 否则, 制冷量采用  $\phi_{ful}(t_j)$  计算,  $j=P+1, P+2, \dots, 14, 15$ , 这里  $n_j$  为制冷季节各温度发生时间。

$$CSTL = \sum_{j=1}^P L_c(t_j) \times n_j + \sum_{j=P+1}^N \phi_{ful}(t_j) \times n_j \quad (2)$$

对于额定制冷量小于等于 7.1kW 的空调器, CSTE 的计算采用式 (3); 否则, 采用式 (4)。

$$CSTE = \sum_{j=1}^P \frac{X(t_j) \times P_{haf}(t_j) \times n_j}{PLF(t_j)} + \quad (3)$$

$$\sum_{j=P+1}^M P_{hf}(t_j) \times n_j + \sum_{j=M+1}^N P_{ful}(t_j) \times n_j$$

式 (3) 的计算分为 3 个部分: 在中间能力点以下断续运行; 在中间能力和额定能力之间连续运行; 以额定能力连续运行。

$$CSTE = \sum_{j=1}^K \frac{X(t_j) \times P_{min}(t_j) \times n_j}{PLF(t_j)} + \quad (4)$$

$$\sum_{j=K+1}^P P_{mh}(t_j) \times n_j + \sum_{j=P+1}^M P_{hf}(t_j) \times n_j + \sum_{j=M+1}^N P_{ful}(t_j) \times n_j$$

式 (4) 的计算分为 4 个部分: 在 25% 额定制冷能力以下断续运行; 以 25% 额定制冷能力与额定中间制冷能力之间连续运行; 在中间能力和额定能力之间连续运行; 以额定能力连续运行。

HSTL 的计算如式 (5) 所示。

$$HSTL = \sum_{j=1}^N L_h(t_j) \times n_j \quad (5)$$

式中:  $L_h(t_j)$  为制热季节温度  $t_j$  时房间的热负荷;  $n_j$  为制热季节各温度发生时间。

HSTE 的计算分为 2 部分, 断续制热、辅助电热 2 个部分, 其中断续制热的计算又分为多个部

分, 如式 (6) 所示。

$$HSTE = \sum_{j=1}^N \frac{X(t_j) \times P(t_j) \times n_j}{PLF(t_j)} + \sum_{j=P+1}^N P_{RH}(t_j) \times n_j \quad (6)$$

## 1.2 数据获取与处理

通过查阅某些品牌的电子说明书, 获取了 26 机型、35 机型、51 机型、72 机型热泵空调的技术参数, 如表 2 所示。为研究冷量及消耗功率与 APF、CSTL、CSTE、HSTL、HSTE 及各部分之间的关系, 对单个能力, 以 0.1% 的间距生成其 -15%~+15% 之间均匀分布的数据, 并保持其他技术参数不变, 然后按照 GB 21455 的公式计算并分析 APF 随单个能力变化的情况。

## 2 各能力对 APF 的影响机制

### 2.1 各能力中有悖于节能评价的情形

APF 随对应能力变化有悖于节能评价的情形, 即冷量增加而 APF 降低、消耗功率增加而 APF 升高。经计算分析, 发现有悖于 GB 21455-2019 初衷的情形仅发生在制冷能力相关参数中: 在  $CC \leq$

7.1kW 的机型中, 包括  $\varnothing_{ful}(35)$ 、 $\varnothing_{haf}(35)$ 、 $\varnothing_{ful}(29)$ 、 $P_{haf}(35)$ 、 $P_{ful}(29)$ ; 在  $CC > 7.1kW$  的机型中, 包括  $\varnothing_{ful}(35)$ 、 $\varnothing_{ful}(29)$ 、 $\varnothing_{min}(35)$ 、 $P_{min}(35)$ 、 $P_{ful}(29)$ 。

分析表明 CSTL 与  $\varnothing_{haf}(35)$ 、 $\varnothing_{min}(35)$ 、 $\varnothing_{haf}(29)$ 、 $\varnothing_{min}(29)$  无关, HSTL 仅与  $\varnothing_{ful}(35)$  有关且 HSTE 与  $\varnothing_{ful}(35)$  存在关联, 但 HSTL、HSTE 与  $\varnothing_{ful}(35)$  之间应无关联性, HSTL 应与  $\varnothing_{ful}(7)$ 、 $\varnothing_{haf}(7)$ 、 $\varnothing_{min}(7)$ 、 $\varnothing_{ext,f}(2)$  关联,  $\varnothing_{haf}(35)$ 、 $\varnothing_{min}(35)$ 、 $\varnothing_{haf}(29)$ 、 $\varnothing_{min}(29)$  应参与 CSTL 的计算, 故 APF 与相关能力之间的一些关联是不合理的; 根据式 (1)~(5), 恰当的关联关系应为 CSTL 与  $\varnothing_X(35)$ 、 $\varnothing_X(29)$  关联, CSTE 与  $\varnothing_X(35)$ 、 $\varnothing_X(29)$ 、 $P_X(35)$ 、 $P_X(29)$  关联, HSTL 与  $\varnothing_X(7)$ 、 $\varnothing_{ext,f}(2)$  关联, HSTE 与  $\varnothing_X(7)$ 、 $\varnothing_{ext,f}(2)$ 、 $P_X(7)$ 、 $P_{ext,f}(2)$  关联, 下标 X 表示 ful、haf、min, 如表 3 所示。

表 2 各机型空调的技术参数

Table 2 Technical parameters of each model of air conditioners

| 技术指标       |    |                          | 各机型的技术参数 |       |       |       |
|------------|----|--------------------------|----------|-------|-------|-------|
| 名称         | 单位 | 符号                       | 26 机型    | 35 机型 | 51 机型 | 72 机型 |
| 全年能源消耗效率   | —  | APF                      | 5.28     | 5.29  | 4.68  | 4.39  |
| 额定制冷量      | W  | $\varnothing_{ful}(35)$  | 2600     | 3500  | 5110  | 7210  |
| 额定制冷消耗功率   | W  | $P_{ful}(35)$            | 590      | 810   | 1250  | 1970  |
| 额定中间制冷量    | W  | $\varnothing_{haf}(35)$  | 1300     | 1650  | 2600  | 3600  |
| 额定中间制冷消耗功率 | W  | $P_{haf}(35)$            | 340      | 400   | 445   | 660   |
| 低温额定制冷量    | W  | $\varnothing_{ful}(29)$  | 2800     | 3500  | 5250  | 7210  |
| 低温额定制冷消耗功率 | W  | $P_{ful}(29)$            | 600      | 740   | 1200  | 1950  |
| 低温中间制冷量    | W  | $\varnothing_{haf}(29)$  | 1450     | 1800  | 2750  | 3720  |
| 低温中间制冷消耗功率 | W  | $P_{haf}(29)$            | 185      | 225   | 400   | 580   |
| 额定制热量      | W  | $\varnothing_{ful}(7)$   | 4500     | 5000  | 7210  | 9660  |
| 额定制热消耗功率   | W  | $P_{ful}(7)$             | 1210     | 1245  | 2000  | 2950  |
| 额定中间制热量    | W  | $\varnothing_{haf}(7)$   | 2200     | 2400  | 3600  | 4750  |
| 额定中间制热消耗功率 | W  | $P_{haf}(7)$             | 420      | 435   | 680   | 950   |
| 额定低温制热量    | W  | $\varnothing_{ext,f}(2)$ | 4310     | 4855  | 6200  | 8800  |
| 额定低温制热消耗功率 | W  | $P_{ext,f}(2)$           | 1581     | 1709  | 2250  | 3380  |
| 25%额定制冷量   | W  | $\varnothing_{min}(35)$  | —        | —     | —     | 1800  |

续表 2 各机型空调的技术参数

Table 2 Technical parameters of each model of air conditioners

| 技术指标        |    |                          | 各机型的技术参数 |       |       |       |
|-------------|----|--------------------------|----------|-------|-------|-------|
| 名称          | 单位 | 符号                       | 26 机型    | 35 机型 | 51 机型 | 72 机型 |
| 25%额定制冷消耗功率 | W  | $P_{\min}(35)$           | —        | —     | —     | 300   |
| 25%低温制冷量    | W  | $\varnothing_{\min}(29)$ | —        | —     | —     | 1950  |
| 25%低温制冷消耗功率 | W  | $P_{\min}(29)$           | —        | —     | —     | 265   |
| 25%额定制热量    | W  | $\varnothing_{\min}(7)$  | —        | —     | —     | 2400  |
| 25%额定制热消耗功率 | W  | $P_{\min}(7)$            | —        | —     | —     | 370   |

表 3 APF 与各能力之间的关联及改进建议

Table 3 The correlation between APF and various capabilities and suggestions for improvement

| 指标          | 现行关联关系                                                                     | 关联关系改进建议                                                                                         |
|-------------|----------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>CSTL</i> | $\varnothing_{ful}(35), \varnothing_{ful}(29)$                             | 增加: $\varnothing_{haf}35, \varnothing_{\min}(35), \varnothing_{haf}(29), \varnothing_{\min}(29)$ |
|             | $\varnothing_{ful}(35), P_{ful}(35), \varnothing_{haf}(35), P_{haf}(35)$   |                                                                                                  |
| <i>CSTE</i> | $\varnothing_{\min}(35), P_{\min}(35)$                                     | 增加: $\varnothing_{ful}(29)$                                                                      |
|             | $P_{ful}(29), \varnothing_{haf}(29), P_{haf}(29)$                          |                                                                                                  |
| <i>APF</i>  | $\varnothing_{\min}(29), P_{\min}(29)$                                     |                                                                                                  |
| <i>HSTL</i> | $\varnothing_{ful}(35)$                                                    | 删除: $\varnothing_{ful}(35)$                                                                      |
|             | $\varnothing_{ful}(35)$                                                    | 增加: $\varnothing_{ful}(7), \varnothing_{haf}(7), \varnothing_{\min}(7), \varnothing_{ext,f}(2)$  |
| <i>HSTE</i> | $\varnothing_{ful}(7), P_{ful}(7), \varnothing_{haf}(7), P_{haf}(7)$       | 删除: $\varnothing_{ful}(35)$                                                                      |
|             | $\varnothing_{\min}(7), P_{\min}(7), \varnothing_{ext,f}(2), P_{ext,f}(2)$ |                                                                                                  |

对于 51 机、72 机,  $\varnothing_{ful}(35)$  在 -15%~+15% 范围内增加时, 由于 *CSTL*、*HSTL*、*CSTE*、*HSTE* 随之增加, 且由于 *CSTL* 与 *HSTL* 之和的增加小于 *CSTE* 与 *HSTE* 之和的增加, 故 *APF* 减少。

对于  $CC \leq 7.1\text{kW}$  的机型, 当  $\varnothing_{haf}(35)$  在 -15%~+15% 之间增加时, 式 (3) 中第 1 部分的值增加、第 2 部分的值减少、第 3 部分的值不变, 且由于第 1 部分增加的值更多, 故总的 *CSTE* 增加, *APF*、*SEER* 随  $\varnothing_{haf}(35)$  的增加而减少。当  $P_{haf}(35)$  在 -15%~+15% 之间增加时, 式 (3) 中第 1 部分的值减少、第 2 部分的值增加 (26 机、35 机) 或减少 (51 机)、第 3 部分的值不变, 且由于第 1 部分减少的值更多 (26 机、35 机), 导致总的 *CSTE* 减少, *APF*、*SEER* 随  $P_{haf}(35)$  的增加而增加。

对于  $CC > 7.1\text{kW}$  的机型, 当  $\varnothing_{\min}(35)$  在 -15%~+15% 之间增加时, 式 (4) 中第 1 部分的值

先增加后减少、第 2 部分的值先减少后增加、第 3 部分和第 4 部分的值不变, 且由于第 1 部分增加的值更多或第 2 部分增加的值更多, 导致总的 *CSTE* 增加, *APF*、*SEER* 随  $\varnothing_{\min}(35)$  的增加而减少。当  $P_{\min}(35)$  在 -15%~+15% 之间增加时, 式 (4) 中第 1 部分的值减少、第 2 部分的值也减少、第 3 部分和第 4 部分的值不变, 导致总的 *CSTE* 减少, *APF*、*SEER* 随  $P_{\min}(35)$  的增加而增加。

当  $\varnothing_{ful}(29)$  在 -15%~+15% 之间增加时, 式 (2) 中第 1 部分的值不变化、第 2 部分的值减少, 导致总的 *CSTL* 减少, *APF*、*SEER* 随  $\varnothing_{ful}(29)$  的增加而减少。当  $P_{ful}(29)$  在 -15%~+15% 之间增加时, 对于  $CC \leq 7.1\text{kW}$  的机型, 式 (3) 中第 1 部分和第 2 部分的值不变、第 3 部分的值减少; 对于  $CC > 7.1\text{kW}$  的机型, 式 (4) 中第 1 部分、第 2 部分和第 3 部分的值不变、第 4 部分的值减少, 导致总的 *CSTE* 减少, *APF*、*SEER* 随  $P_{ful}(29)$  的增加而增

加。

## 2.2 APF 与各能力之间的线性关系

使用 sklearn.linear\_model 中的线性回归方法 LinearRegression() 对结果进行定量分析, 各能力变化百分比与 APF 值变化的关系, 如表 4 所示, 其中拟合参数  $\beta$  表示对应能力变化 1% 时, APF 的变化

值, 拟合优度  $R^2$  表示对应能力与 APF 之间的相关性。以 26 机型的  $\varnothing_{ful}(35)$  为例, 其  $\beta$  为 0.0115、 $R^2$  为 0.9926, 即当其  $\varnothing_{ful}(35)$  增加 1% 时, APF 增加 0.0115, 解释能力为 99.26% 即具有高度相关性。

表 4 各能力与 APF 之间的线性特征

Table 4 The linear characteristics between each capability and APF

| 技术指标                     | 26 机型    |        | 35 机型    |        | 51 机型    |        | 72 机型    |        |
|--------------------------|----------|--------|----------|--------|----------|--------|----------|--------|
|                          | $\beta$  | $R^2$  | $\beta$  | $R^2$  | $\beta$  | $R^2$  | $\beta$  | $R^2$  |
| $\varnothing_{ful}(35)$  | 0.0115   | 0.9926 | 0.0072   | 0.9575 | -0.0034* | 0.9100 | -0.0054* | 0.9995 |
| $P_{ful}(35)$            | -0.0136  | 0.9985 | -0.0139  | 0.9984 | -0.0117  | 0.9985 | -0.0115  | 0.9984 |
| $\varnothing_{haf}(35)$  | -0.0003* | 0.9925 | -0.0007* | 0.9998 | -0.0005* | 0.9982 | 0.0004   | 0.9944 |
| $P_{haf}(35)$            | 0.0015*  | 0.9999 | 0.0028*  | 1.0000 | 0.0012*  | 1.0000 | -0.0004  | 1.0000 |
| $\varnothing_{ful}(29)$  | -0.0004* | 1.0000 | -0.0004* | 1.0000 | -0.0003* | 1.0000 | -0.0003* | 1.0000 |
| $P_{ful}(29)$            | 0.0004*  | 1.0000 | 0.0004*  | 1.0000 | 0.0003*  | 1.0000 | 0.0003*  | 1.0000 |
| $\varnothing_{haf}(29)$  | 0.0108   | 0.9987 | 0.0116   | 0.9982 | 0.0172   | 0.9967 | 0.0138   | 0.9927 |
| $P_{haf}(29)$            | -0.0179  | 0.9987 | -0.0186  | 0.9984 | -0.0164  | 0.9985 | -0.0105  | 0.9982 |
| $\varnothing_{ful}(7)$   | 0.0128   | 0.9735 | 0.0180   | 0.9914 | 0.0151   | 0.9948 | 0.0152   | 0.9979 |
| $P_{ful}(7)$             | -0.0072  | 0.9980 | -0.0109  | 0.9984 | -0.0082  | 0.9985 | -0.0085  | 0.9984 |
| $\varnothing_{haf}(7)$   | 0.0181   | 1.0000 | 0.0118   | 1.0000 | 0.0103   | 1.0000 | 0.0086   | 0.9996 |
| $P_{haf}(7)$             | -0.0159  | 0.9985 | -0.0108  | 0.9987 | -0.0090  | 0.9988 | -0.0062  | 0.9984 |
| $\varnothing_{ext,f}(2)$ | 0.0009   | 0.8535 | 0.0055   | 0.9180 | 0.0079   | 0.9462 | 0.0088   | 0.8878 |
| $P_{ext,f}(2)$           | -0.0003  | 0.9993 | -0.0020  | 0.9993 | -0.0028  | 0.9997 | -0.0033  | 0.9994 |
| $\varnothing_{min}(35)$  | —        | —      | —        | —      | —        | —      | -0.0012* | 0.9992 |
| $P_{min}(35)$            | —        | —      | —        | —      | —        | —      | 0.0016*  | 0.9999 |
| $\varnothing_{min}(29)$  | —        | —      | —        | —      | —        | —      | 0.0039   | 0.9981 |
| $P_{min}(29)$            | —        | —      | —        | —      | —        | —      | -0.0043  | 0.9990 |
| $\varnothing_{min}(7)$   | —        | —      | —        | —      | —        | —      | 0.0012   | 0.9999 |
| $P_{min}(7)$             | —        | —      | —        | —      | —        | —      | -0.0010  | 0.9992 |

APF 与冷量负相关、与消耗功率正相关时, 则有悖于 GB 21455-2019 初衷的情形发生, 如表 4 中线性系数标\*的情形。尽管 51 机型、72 机型的  $\varnothing_{ful}(35)$ , 26 机型、35 机型、51 机型的  $\varnothing_{haf}(35)$ , 26 机型、35 机型、51 机型、72 机型的  $\varnothing_{ful}(29)$ 、 $P_{ful}(29)$ , 以及 72 机型的  $\varnothing_{min}(35)$ 、 $P_{min}(35)$ 、 $P_{haf}(35)$  的拟合参数绝对值均小于 0.01 且拟合优度  $R^2$  均大于 90%, 对 APF 的影响程度较小, 但其综合对 APF 的影响会导致与产品实际质量不匹配, 故现行 APF 计算方法存在一定缺陷。在改进 APF 计算方面, 建议先调整测试工况为标准规定的季节各温度的最高值、中间值、最小值(CC>7.1kW 时), 然后改进 100% 负荷点的温度。在此基础上,

优化 APF 与各能力之间的关联, 如在制热指标计算时将  $\varnothing_{ful}(35)$  调整为  $\varnothing_{ful}(7)$ , 即制热工况房间热负荷采用实测制热量。

从提高 APF 的角度分析, 应优先提高表 4 中  $\beta$  绝对值大于 0.01 的能力, 其中按  $\beta$  绝对值从大到小的排序, 26 机型为  $\varnothing_{haf}(7) > P_{haf}(29) > P_{haf}(7) > P_{ful}(35) > \varnothing_{ful}(7) > \varnothing_{ful}(35) > \varnothing_{haf}(29)$ , 35 机型为  $P_{haf}(29) > \varnothing_{ful}(7) > P_{ful}(35) > \varnothing_{haf}(7) > \varnothing_{haf}(29) > P_{ful}(7) > P_{haf}(7)$ , 51 机型为  $\varnothing_{haf}(29) > P_{haf}(29) > \varnothing_{ful}(7) > P_{ful}(35) > \varnothing_{haf}(7)$ , 72 机型为  $\varnothing_{ful}(7) > \varnothing_{haf}(29) > P_{ful}(35) > P_{haf}(29)$ , 由此

得提高  $APF$  的措施包括提升  $\varnothing_{ful}(35)$ 、 $\varnothing_{haf}(29)$ 、 $\varnothing_{ful}(7)$ 、 $\varnothing_{haf}(7)$ ，以及降低  $P_{ful}(35)$ 、 $P_{haf}(29)$ 、 $P_{ful}(7)$ 、 $P_{haf}(7)$ 。

表 4 的拟合优度表明各机型  $APF$  与各能力之间均高度相关，故可建立各机型  $APF$  与各能力的

拟合方程。同样使用前述  $LinearRegression()$  方法，在各能力与  $APF$  之间进行线性回归，现行  $APF$  计算方法下所研究的各机型的拟合式及拟合优度如下，其中拟合式中各能力的拟合参数表示对应能力变化 1 个单位时， $APF$  的变化值。

26 机型的拟合式，其拟合优度  $R^2$  为 0.9903：

$$\begin{aligned} APF = & 5.2413 + 4.4305 \times 10^{-4} \times \varnothing_{ful}(35) - 0.0023 \times P_{ful}(35) - 1.9806 \times 10^{-5} \times \varnothing_{haf}(35) \\ & + 4.5544 \times 10^{-4} \times P_{haf}(35) - 1.3486 \times 10^{-5} \times \varnothing_{ful}(29) + 7.1252 \times 10^{-5} \times P_{ful}(29) \\ & + 7.4469 \times 10^{-4} \times \varnothing_{haf}(29) - 0.0097 \times P_{haf}(29) + 2.8454 \times 10^{-4} \times \varnothing_{ful}(7) \\ & - 5.9687 \times 10^{-4} \times P_{ful}(7) + 8.2068 \times 10^{-4} \times \varnothing_{haf}(7) - 0.0038 \times P_{haf}(7) \\ & + 2.1373 \times 10^{-5} \times \varnothing_{ext,f}(2) - 2.1572 \times 10^{-5} \times P_{ext,f}(2) \end{aligned}$$

35 机型的拟合式，其拟合优度  $R^2$  为 0.9863：

$$\begin{aligned} APF = & 5.2837 + 2.0529 \times 10^{-4} \times \varnothing_{ful}(35) - 0.0017 \times P_{ful}(35) - 4.3316 \times 10^{-5} \times \varnothing_{haf}(35) \\ & + 7.0424 \times 10^{-4} \times P_{haf}(35) - 1.0024 \times 10^{-5} \times \varnothing_{ful}(29) + 5.3008 \times 10^{-5} \times P_{ful}(29) \\ & + 6.4228 \times 10^{-4} \times \varnothing_{haf}(29) - 0.0083 \times P_{haf}(29) + 3.6018 \times 10^{-4} \times \varnothing_{ful}(7) \\ & - 8.7850 \times 10^{-4} \times P_{ful}(7) + 4.9214 \times 10^{-4} \times \varnothing_{haf}(7) - 0.0025 \times P_{haf}(7) \\ & + 1.1345 \times 10^{-4} \times \varnothing_{ext,f}(2) - 1.1821 \times 10^{-4} \times P_{ext,f}(2) \end{aligned}$$

51 机型的拟合式，其拟合优度  $R^2$  为 0.9869：

$$\begin{aligned} APF = & 4.7093 - 6.7230 \times 10^{-5} \times \varnothing_{ful}(35) - 9.3208 \times 10^{-4} \times P_{ful}(35) - 1.9308 \times 10^{-5} \times \varnothing_{haf}(35) \\ & + 2.6778 \times 10^{-4} \times P_{haf}(35) - 6.0824 \times 10^{-6} \times \varnothing_{ful}(29) + 2.8492 \times 10^{-5} \times P_{ful}(29) \\ & + 6.2580 \times 10^{-4} \times \varnothing_{haf}(29) - 0.0041 \times P_{haf}(29) + 2.1011 \times 10^{-4} \times \varnothing_{ful}(7) \\ & - 4.1189 \times 10^{-4} \times P_{ful}(7) + 2.8569 \times 10^{-4} \times \varnothing_{haf}(7) - 0.0013 \times P_{haf}(7) \\ & + 1.2674 \times 10^{-4} \times \varnothing_{ext,f}(2) - 1.2295 \times 10^{-4} \times P_{ext,f}(2) \end{aligned}$$

72 机型的拟合式，其拟合优度  $R^2$  为 0.9774：

$$\begin{aligned} APF = & 4.2617 - 7.4279 \times 10^{-5} \times \varnothing_{ful}(35) - 5.8404 \times 10^{-4} \times P_{ful}(35) + 1.1778 \times 10^{-5} \times \varnothing_{haf}(35) \\ & - 5.7322 \times 10^{-5} \times P_{haf}(35) - 6.4430 \times 10^{-5} \times \varnothing_{min}(35) + 5.4804 \times 10^{-4} \times P_{min}(35) \\ & - 4.0428 \times 10^{-6} \times \varnothing_{ful}(29) + 1.7763 \times 10^{-5} \times P_{ful}(29) + 3.6963 \times 10^{-4} \times \varnothing_{haf}(29) \\ & - 0.0018 \times P_{haf}(29) + 1.9754 \times 10^{-4} \times \varnothing_{min}(29) - 0.0016 \times P_{min}(29) + 1.5760 \times 10^{-4} \times \varnothing_{ful}(7) \\ & - 2.8811 \times 10^{-4} \times P_{ful}(7) + 1.8063 \times 10^{-4} \times \varnothing_{haf}(7) - 6.4886 \times 10^{-4} \times P_{haf}(7) \\ & + 5.0778 \times 10^{-5} \times \varnothing_{min}(7) - 2.8232 \times 10^{-4} \times P_{min}(7) + 9.9618 \times 10^{-5} \times \varnothing_{ext,f}(2) \\ & - 9.7793 \times 10^{-5} \times P_{ext,f}(2) \end{aligned}$$

根据表 4 及现行拟合式，可考虑调整相关拟合参数的方向得到修正拟合式：对表 4 中标\*的拟合

参数，用 -1 乘上其拟合式中对应的拟合参数作为修正后的拟合参数，如对 26 机型的拟合式，将其

$\varnothing_{haf}$  (35) 的现行拟合参数  $-1.9806 \times 10^{-5}$  修正为  $+1.9806 \times 10^{-5}$ ; 然后调整拟合式截距值, 使修正后的拟合式计算结果与与现行计算方法的结果一致, 即按产品标示值进行计算, 修正后拟合式与现行拟合式的结果 100% 吻合。经过修正拟合式, 使 APF 与各能力之间具有合理的关联, 但不改变各能力对 APF 的影响系数, 故可将其应用于实际测量值的计算。

通过测量值对比修正前后的拟合式, 以 26 机

26 机型修正后的拟合式:

$$\begin{aligned} APF = & 5.5112 + 4.4305 \times 10^{-4} \times \varnothing_{ful} (35) - 0.0023 \times P_{ful} (35) + 1.9806 \times 10^{-5} \times \varnothing_{haf} (35) \\ & - 4.5544 \times 10^{-4} \times P_{haf} (35) + 1.3486 \times 10^{-5} \times \varnothing_{ful} (29) - 7.1252 \times 10^{-5} \times P_{ful} (29) \\ & + 7.4469 \times 10^{-4} \times \varnothing_{haf} (29) - 0.0097 \times P_{haf} (29) + 2.8454 \times 10^{-4} \times \varnothing_{ful} (7) \\ & - 5.9687 \times 10^{-4} \times P_{ful} (7) + 8.2068 \times 10^{-4} \times \varnothing_{haf} (7) - 0.0038 \times P_{haf} (7) \\ & + 2.1373 \times 10^{-5} \times \varnothing_{ext,f} (2) - 2.1572 \times 10^{-5} \times P_{ext,f} (2) \end{aligned}$$

35 机型修正后的拟合式:

$$\begin{aligned} APF = & 5.7231 + 2.0529 \times 10^{-4} \times \varnothing_{ful} (35) - 0.0017 \times P_{ful} (35) + 4.3316 \times 10^{-5} \times \varnothing_{haf} (35) \\ & - 7.0424 \times 10^{-4} \times P_{haf} (35) + 1.0024 \times 10^{-5} \times \varnothing_{ful} (29) - 5.3008 \times 10^{-5} \times P_{ful} (29) \\ & + 6.4228 \times 10^{-4} \times \varnothing_{haf} (29) - 0.0083 \times P_{haf} (29) + 3.6018 \times 10^{-4} \times \varnothing_{ful} (7) \\ & - 8.7850 \times 10^{-4} \times P_{ful} (7) + 4.9214 \times 10^{-4} \times \varnothing_{haf} (7) - 0.0025 \times P_{haf} (7) \\ & + 1.1345 \times 10^{-4} \times \varnothing_{ext,f} (2) - 1.1821 \times 10^{-4} \times P_{ext,f} (2) \end{aligned}$$

51 机型修正后的拟合式:

$$\begin{aligned} APF = & 4.1514 + 6.7230 \times 10^{-5} \times \varnothing_{ful} (35) - 9.3208 \times 10^{-4} \times P_{ful} (35) + 1.9308 \times 10^{-5} \times \varnothing_{haf} (35) \\ & - 2.6778 \times 10^{-4} \times P_{haf} (35) + 6.0824 \times 10^{-6} \times \varnothing_{ful} (29) - 2.8492 \times 10^{-5} \times P_{ful} (29) \\ & + 6.2580 \times 10^{-4} \times \varnothing_{haf} (29) - 0.0041 \times P_{haf} (29) + 2.1011 \times 10^{-4} \times \varnothing_{ful} (7) \\ & - 4.1189 \times 10^{-4} \times P_{ful} (7) + 2.8569 \times 10^{-4} \times \varnothing_{haf} (7) - 0.0013 \times P_{haf} (7) \\ & + 1.2674 \times 10^{-4} \times \varnothing_{ext,f} (2) - 1.2295 \times 10^{-4} \times P_{ext,f} (2) \end{aligned}$$

72 机型修正后的拟合式:

$$\begin{aligned} APF = & 3.2885 + 7.4279 \times 10^{-5} \times \varnothing_{ful} (35) - 5.8404 \times 10^{-4} \times P_{ful} (35) + 1.1778 \times 10^{-5} \times \varnothing_{haf} (35) \\ & - 5.7322 \times 10^{-5} \times P_{haf} (35) + 6.4430 \times 10^{-5} \times \varnothing_{min} (35) - 5.4808 \times 10^{-4} \times P_{min} (35) \\ & + 4.0428 \times 10^{-6} \times \varnothing_{ful} (29) - 1.7763 \times 10^{-5} \times P_{ful} (29) + 3.6963 \times 10^{-4} \times \varnothing_{haf} (29) \\ & - 0.0018 \times P_{ful} (29) + 1.9754 \times 10^{-4} \times \varnothing_{min} (29) - 0.0016 \times P_{min} (29) + 1.5760 \times 10^{-4} \times \varnothing_{ful} (7) \\ & - 2.8811 \times 10^{-4} \times P_{ful} (7) + 1.8063 \times 10^{-4} \times \varnothing_{haf} (7) - 6.4886 \times 10^{-4} \times P_{haf} (7) \\ & + 5.0778 \times 10^{-5} \times \varnothing_{min} (7) - 2.8232 \times 10^{-4} \times P_{min} (7) + 9.9618 \times 10^{-5} \times \varnothing_{ext,f} (2) \\ & - 9.7793 \times 10^{-5} \times P_{ext,f} (2) \end{aligned}$$

型为例, 当其  $P_{haf}$  (35) 的测量值为标称值的 90% 时, 按现行 APF 计算方法得到 APF 由 5.28 降低到 5.27, 而按修正后的拟合式计算得到 APF 由 5.28 提升到 5.30, 即当  $P_{haf}$  (35) 降低 10% 时, 修正后的拟合式将 APF 提高了 0.6%, 这与产品性能相匹配, 故修正后的拟合式能更合理评价产品能效等级。

所研究的各机型的修正后的拟合式:

### 3 结束语

GB 21455-2019 中 APF 的计算是一个复杂的过程,本文经过计算分析,总结如下:

(1)额定制冷量、额定中间制冷量及消耗功率、额定低温制冷量及消耗功率、25%额定制冷量及消耗功率对 APF 的影响机制会导致节能评价与产品能效等级不匹配。按现行 APF 计算方法,根据产品标称值得到并修正 APF 与各能力之间的拟合式,通过修正拟合式能更合理评价产品能效等级。

(2)实际上空调各个能力都会参与 APF 的计算,且随着节能技术的提升,还存在某些能力与产品标示值的偏离过大,最终导致 APF 结果与预期相反。故还建议根据标准规定的季节温度调整测试工况并改进 APF 计算模型中 100%负荷点的温度,制热工况下房间热负荷采用实测制热量进行计算,改进 CSTL、CSTE、HSTL 与相关能力之间的关联如在 CSTL 计算中加入  $\varnothing_{haf}(35)$ 、 $\varnothing_{haf}(29)$ 、 $\varnothing_{min}(35)$ 、 $\varnothing_{min}(29)$ ,在 CSTE 的计算中加入  $\varnothing_{ful}(29)$ ,在 HSTL 的计算中加入  $\varnothing_{ful}(7)$ 、 $\varnothing_{haf}(7)$ 、 $\varnothing_{min}(7)$ 、 $\varnothing_{ext,f}(2)$ 。

(3)为提高 APF,建议低温制冷采用实测,并完善相应的定义、技术要求。在产品质量本身方面,可优化压缩机运行策略,提高额定制冷量、低温额定中间制冷量、额定制热量、额定中间制热量以及降低对应的消耗功率。

### 参考文献:

- [1] 张磊,赵雨亭,李燕.基于新能效标准的广东省家用空调器节能潜力分析[J].中华环境,2021,(11):78-80.
- [2] GB 21455-2019,房间空气调节器能效限定值及能效等

级[S].北京:中国标准出版社,2019.

- [3] 张海云,徐定华,杭晨哲,等.房间空调器 APF 影响因素分析[J].制冷与空调,2017,17(11):21-25.
- [4] 杨晓,刘丙磊,张立智,等.热泵型变频空调器 APF 计算方法的辨析[C].2017 年中国家用电器技术大会论文集,2017:6.
- [5] 陈炫丞,庄大伟,余岳峰,等.变频空调器 APF 快速计算的显式表达式[J].制冷学报,2023,44(2):68-77.
- [6] 沈佳敏.变频空调器提升 APF 的快速匹配算法及动态特性预测[D].上海:上海交通大学,2019.
- [7] 曹晨,郑明宇,刘骏亚,等.变频型房间空调器全年能源消耗效率分析[J].低温与超导,2022,50(7):28-33.
- [8] 吴阿明,张伟,姚亮,等.热泵型房间空调器性能试验分析[J].制冷与空调,2022,22(2):91-93.
- [9] 董旭,王丽芸,张宁,等.定频房间空调器 APF 影响因素权重算法研究[J].制冷与空调,2022,22(2):70-73,90.
- [10] 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.
- [11] 王鲁平,王骞,李芳,等.转速可控型房间空气调节器制冷季节能源消耗效率评价方法优化研究[J].制冷技术,2022,42(1):52-58.
- [12] 尚凯锋,廖四清,廖健生,等.3.5kW 房间空调器全年能源消耗效率提升策略研究[J].暖通空调,2024,54(S1):118-121.
- [13] 王奎,刘汉阳,杨雷,等.GB 21455-2019 中低温制冷工况参数实测值与计算值对能效评定的影响[J].制冷与空调,2022,22(1):29-32.
- [14] 蔡宁,杨双,李丽艳.房间空气调节器国家标准 GB/T 7725 的修订解析[J].家电科技,2023,(1):18-24.
- [15] GB/T 7725-2022,房间空气调节器[S].北京:中国标准出版社,2022.

(上接第 525 页)

- [16] 张晶,陈涛,黄丽达,等.接触不良引发电发光连接的动态变化[J].清华大学学报(自然科学版),2022,62(6):1000-1009.
- [17] Wang B B. Comparative Research on FLUENT and FDS's Numerical Simulation of Smoke Spread in Subway Platform Fire [C]. In: First International Symposium on Mine Safety Science and Engineering, 2011,26:1065-1075.
- [18] 陈涛,王雨薇,张佳庆,等.典型变压器油燃烧特性及烟

气危害性研究[J].消防科学与技术,2021,40(8):1125-1129.

- [19] 周仁敬,王培海,王龙.地铁站台火灾工况下不同排烟方案的排烟效果数值模拟研究[J].制冷与空调,2024,38(3):313-319.
- [20] 张华锦,毕海权.非着火车厢空调运行对火灾时人员疏散影响研究[J].制冷与空调,2024,38(5):621-628.
- [21] Hjohlman M, Försth M, Axelsson J. Design fire for a train compartment[R]. Fire Technology SP Report, 2009.