

文章编号:0253-4339(2023)02-0068-10
doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2023.02.068

变频空调器 APF 快速计算的显式表达式

陈炫丞 庄大伟 余岳峰 丁国良

(上海交通大学机械与动力工程学院 上海 200240)

摘要 国家标准中给出的空调器能效指标 APF 的确定方法,包含一系列的判断与嵌套计算,过程复杂。本文旨在将新版空调器能效标准 GB 21455—2019 中给出的 APF 系列计算公式转化为显式计算式,从而满足 APF 计算便捷的要求。首先采用将自变量直接代入的方法对国标定义的 APF 的 4 个中间变量进行化简;然后通过数值拟合的办法对化简计算式中需要判定计算区间与分段计算的过程进行简化;最后将 4 个中间变量的显式表达式代入 APF 定义式中,得到 APF 显式表达式。开发的 APF 显式表达式适用于所有额定制冷量范围的变频空调器并具有良好的精度,其中 5 测试工况点、7 测试工况点的 APF 显式表达式相比于空调器能效标准中 APF 的定义式计算误差分别为 0.73%、1.17%。

关键词 APF;空调器;快速计算;显式表达式;空调器能效标准

中图分类号:TB61⁺1;TB657.2

文献标识码:A

Explicit Expressions for Rapid Evaluation of APF in Variable-frequency Air Conditioners

Chen Xuancheng Zhuang Dawei Yu Yuefeng Ding Guoliang

(School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, 200240, China)

Abstract The determination method for the annual performance factor (APF) of the air conditioner energy efficiency index given in the national standard involves a series of evaluations and nested calculations, and the process is complex. The objective of this study is to convert the APF calculation formulas given in the new National Standard GB 21455—2019 into explicit calculation expressions, meeting the requirements for convenient APF calculation. The adopted method is as follows: first, the four intermediate variables of the APF are simplified by directly substituting independent variables; then, the process of determining the calculation interval and segmental calculation is simplified by means of numerical fitting; finally, the APF explicit expressions are obtained by substituting the explicit expressions of the four intermediate variables into the APF definition. The developed APF explicit expressions apply to variable-frequency air conditioners with different rated cooling capacities with good accuracy. Based on the definition of the APF in the National Standard, the calculation errors of the explicit expression for the 5-test working conditions and 7-test working conditions are 0.73% and 1.17%, respectively.

Keywords APF; air conditioner; rapid calculation; explicit expression; energy efficiency standard for air conditioners

空调器的能效指标经历了从制冷性能系数 EER (energy efficiency ratio) 到全年能源消耗效率 APF (annual performance factor) 的变化过程^[1-3]。获取 EER 仅需测试额定制冷一个工况点^[4];获取 APF 需要的测试工况数与额定制冷量的大小有关,按额定制冷量 ≤ 7.1 kW 和 >7.1 kW 这两种情况,分别需要测试 5 个和 7 个工况点^[5-6]。能效值测试工况点从 1 个增至 5 个或 7 个时,不仅意味着单次测试能效值的工作量增至原来的 5 倍或 7 倍,更使得基于实验匹配来获得最大能效值的方法变得极为困难^[7-10]。

减少实验测试量的发展方向是采用基于计算机仿真的空调器优化设计技术。但用 APF 代替 EER

后,由于需要性能要求工况点的增加,优化过程的计算量将大幅增加^[11-13]。国家标准给出的 APF 计算方法包含一系列的判断与嵌套计算,过程过于复杂。为保证优化技术的实用,须大幅提升 APF 计算速度,因此需要开发能够快速计算 APF 的显式表达式^[14-15]。

沈佳敏等^[14-15]基于 GB/T 7725—2004^[5]的定义,对 5 个测试工况点下的 APF 计算提出了显式表达式,用于变频空调器 APF 的优化。该研究未提出 7 个测试工况下的 APF 显式计算方法,且所得 5 点测试工况下的计算式依赖的国家标准已更新,APF 的定义计算式已有变化,修改了超低温制热工况的室外

侧温度、制热工况房间热负荷、运行时室外环境温度及各温度下的运行时间^[5-6]。

本文目的是根据最新空调器能效国家标准 GB 21455—2019^[6]对 APF 计算的定义,提出能够覆盖所有冷量变频空调器的 APF 显式表达式,包括采用 5 个工况点测试和 7 个工况点测试的情形。

1 技术思路

依据国家标准计算 APF 的复杂性在于没有一个直接的显式 APF 计算式可用,而是必须经过一系列的中间计算过程。国标中 APF 定义式为季节制冷量 CSTL (cooling seasonal total load)、季节制热量 HSTL (heating seasonal total load)、制冷季节耗电量 CSTE (cooling seasonal total energy)、制热季节耗电量 HSTE (heating seasonal total energy) 这 4 个中间变量的表达式;这些中间变量的计算,还需依赖于测得的 5 个或 7 个测试工况的性能参数、国标定义的运行室外温度、各温度下的发生时间、每个运行温度对应的房间热负荷、对应的各工况换热能力与能耗^[6]。

本文开发能够直接计算 APF 的显式表达式,拟借用文献[14-16]的思路:1)将运行温度代入房间热负荷的计算式,将各温度下的运行时间代入 CSTL、HSTL 定义式中,可直接推导得到 CSTL、HSTL 的显式计算式;2)将测试工况的性能参数代入 HSTE、CSTE 的定义式中推导不同工况区间内能耗的计算式,再通过数值拟合的方法简化判定计算区间与分段计算的过程,推导得到 CSTE、HSTE 的显式计算式,解决计算时间长且无法显式计算 CSTE、HSTE 的问题;3)最后将 4 个中间变量的显式计算式代入 APF 定义式中,得到通过测试工况的性能参数快速计算 APF 的显式计算式。

本文需要解决的问题,一方面源自于国标对于 APF 的计算方法的改变,包括:将超低温制热工况的室外侧温度由-8.5℃修改为-7℃,将制热工况房间热负荷计算公式中的一个系数由 1.39 修改为 1.25,修改了运行时室外环境温度及各温度下的运行时间^[5-6]。另一方面需要解决的问题是要将原来只适用于 5 个测试工况点的显式表达式,扩展到能够覆盖 7 个测试工况点^[6]。为解决上述问题,需要做以下两方面的工作:1)开发 GB 21455—2019^[6]中规定的测试 7 个工况点情况下的 APF 显式表达式;2)依据 GB 21455—2019^[6],重新推导获得测试 5 个工况点情况下的 APF 显式表达式。

对于 7 个测试工况点 APF 显式表达式,要将最小制冷与最小制热两个工况加入推导中,并根据修改

后的 APF 计算方法,分别推导 APF 的 4 个中间变量 CSTL、HSTL、HSTE、CSTE 的显式表达式。

对于 5 个测试工况点 APF 显式计算式,无需考虑最小制冷与最小制热两个工况。季节制冷量 CSTL 和季节制热量 HSTL 与最小制冷和最小制热两个工况无关,所以 CSTL 和 HSTL 的显式表达式与 7 个测试工况点的推导结果相同;而制冷季节耗电量 CSTE 与制热季节耗电量 HSTE 的显式表达式需要根据修改后的 APF 计算方法重新推导。

工作开展的技术路线如表 1 所示。

2 开发 7 测试工况 APF 显式表达式

国标对 APF 计算方法中的超低温制热工况温度、制热工况房间热负荷、运行时室外环境温度及各温度下发生时间进行修改以后,必须根据修改后的方法来推导 7 测试工况 APF 显式计算式,包括对 4 个中间变量 CSTL、HSTL、HSTE、CSTE 的显式表达式进行推导^[6]。

2.1 CSTL 显式表达式的推导

季节制冷量 CSTL 的定义式如国标中式 A.3^[6]所示。计算需要经过 2 个步骤:1)通过插值法计算每个运行温度对应的房间热负荷和以额定制冷能力运行的制冷量;2)根据每个温度的运行时间对房间热负荷和额定制冷能力运行制冷量中的较小值进行加权求和。

本文思路是直接运行温度代入房间热负荷的计算式,并将各温度下的运行时间代入 CSTL 定义式中,从而把 CSTL 推导为一个关于额定制冷量的显式计算式。

当室外温度低于 35℃时,CSTL 根据制冷季节房间热负荷与相应运行时间进行计算;当室外温度高于 35℃时,CSTL 根据空调器的制冷能力与相应运行时间进行计算,而房间热负荷与空调器的制冷能力都是关于室外温度与额定制冷量的函数。将制冷运行温度、各温度下运行时间和房间热负荷与额定制冷能力运行制冷量的计算公式(国标中式 A.1、A.4^[6])代入 CSTL 的定义式,可得 CSTL 关于额定制冷工况制冷量 $\Phi_1(W)$ 的显式计算式,如式(1)所示。

$$CSTL = 623.01\Phi_1 \quad (1)$$

2.2 HSTL 显式表达式的推导

季节制热量 HSTL 的定义式如国标中式 A.33^[6]所示。计算需要经过 2 个步骤:1)通过插值法计算各制热运行温度下对应的房间热负荷;2)根据各温度的运行时间对房间热负荷进行加权求和。

表 1 技术路线
Tab.1 Technical router

APF 显式计算方法	已有的方法	新开发的方法	
适用范围	仅适用于额定制冷量 ≤ 7.1 kW	额定制冷量 ≤ 7.1 kW	额定制冷量 > 7.1 kW
输入参数	5 个工况点换热量与能耗; 额定制冷、中间制冷、额定制热、中间制热、低温制热。 超低温制热工况室外温度: -8.5 °C 运行室外环境温度及运行时间: 见 GB 7725—2004 中表 E. 4、表 E. 7 ^[5] 制热房间热负荷: $L_h(t_j) = 1.39 \times 0.82 \Phi_{in}(35) \times \frac{17-t_j}{17}$	5 个工况点换热量与能耗; 额定制冷、中间制冷、额定制热、中间制热、低温制热。 超低温制热工况室外温度: -7 °C 运行室外环境温度及运行时间: 见 GB 21455—2019 中表 B. 1、表 B. 2 ^[6] 制热房间热负荷: $L_h'(t_j) = 1.25 \times 0.82 \Phi_{in}(35) \times \frac{17-t_j}{17}$	7 个工况点换热量与能耗; 额定制冷、中间制冷、额定制热、中间制热、低温制热、最小制冷、最小制热。
计算过程	CSTL	通过直接代入的方法获得 CSTL 关于额定制冷换热量的显式计算式。	
	HSTL	通过直接代入的方法获得 HSTL 关于额定制冷换热量的显式计算式。	
	CSTE	通过直接代入、数值拟合的方法获得 CSTE 关于额定制冷、中间制冷性能参数的显式计算式。	通过直接代入、数值拟合的方法获得 CSTE 关于额定制冷、中间制冷、最小制冷性能参数的显式计算式。
	HSTE	通过直接代入、数值拟合的方法获得 HSTE 关于额定制冷、额定制热、中间制热、低温制热性能参数的显式计算式。	通过直接代入、数值拟合的方法获得 HSTE 关于额定制冷、额定制热、中间制热、低温制热、最小制热性能参数的显式计算式。
输出: APF 显式计算式	已有的 5 测试工况点的显式计算式	新开发的 5 测试工况点显式计算式	新开发的 7 测试工况点显式计算式

注: $L_h(t_j)$ 为制热房间热负荷, W; $\Phi_{in}(35)$ 为额定制冷量, W。

本文思路是直接运行温度代入房间热负荷的计算式, 并将各温度下的运行时间代入 HSTL 定义式中, 从而把 HSTL 推导为一个关于额定制冷量的显式计算式。

HSTL 根据制热季节房间热负荷与相应运行时间进行计算, 而房间热负荷是额定制冷量与室外温度的函数。将制热运行温度、各温度下运行时间和房间热负荷的计算公式(国标中式 A. 31^[6])代入 HSTL 的定义式, 可得 HSTL 关于额定制冷工况制冷量 Φ_1 的显式计算式, 如式(2)所示。

$$HSTL = 331.20 \Phi_1 \quad (2)$$

2.3 CSTE 显式表达式的推导

为获得可直接计算的 7 测试工况点 CSTE 显式表达式, 首先对国标的 CSTE 定义式进行推导化简, 然后对 CSTE 简化计算式中无法直接计算的部分进行近似拟合处理。

2.3.1 根据国标定义式推导的 CSTE 化简结果

国标中 7 测试工况点制冷季节耗电量 CSTE 计算共需要用到 17 个公式(国标中式 A. 14~A. 30^[6]), 较为复杂。

将国标中式 A. 14~A. 21、A. 23~A. 30^[6] 代入 CSTE 定义式并化简得到简化的 CSTE 计算式, 但仍需要 5 个方程, 如式(3)~式(7)所示。式(3)中功耗 $P(t_j)$ 的计算需要根据房间热负荷 $L_c(t_j)$ 与各制冷工况能力 $\Phi_i(t_j)$ 的大小关系(图 1)选用相应的方程; 式(4)~式(7)分别对应图 1 中(a)~(d)区域。

$$CSTE_{7\text{测试工况}} = \sum_{j=1}^{15} P(t_j) n_j \quad (3)$$

$$P(t_j) = P_0 \times \frac{(t_j - 23)(0.086t_j + 2.99)}{1.5(t_j - 23) + 9(-0.077t_j + 8.695) \Phi_6 / \Phi_1}$$

$$(L_c(t_j) \leq \Phi_{\min}(t_j)) \quad (4)$$

$$P(t_j) = P_2 \times$$

$$\frac{t_j - 23}{12} \times \left(\frac{23\Phi_1 + 17.39\Phi_2}{\Phi_1 + 0.154\Phi_2} - \frac{23\Phi_1 + 17.39\Phi_6}{\Phi_1 + 0.154\Phi_6} \right) \times \frac{\Phi_1}{\Phi_2}$$

$$\left(t_j - \frac{23\Phi_1 + 17.39\Phi_6}{\Phi_1 + 0.154\Phi_6} \right) \times \frac{6.924\Phi_1}{4.968\Phi_1 + 1.956\Phi_2} + \left(\frac{23\Phi_1 + 17.39\Phi_2}{\Phi_1 + 0.154\Phi_2} - t_j \right) \times \frac{6.924\Phi_1}{4.968\Phi_1 + 1.956\Phi_6} \times \frac{EER_6}{EER_2}$$

$$(\Phi_{\min}(t_j) < L_c(t_j) \leq \Phi_{\text{haf}}(t_j)) \quad (5)$$

$$P(t_j) = P_1 \times \frac{\Phi_1 - \Phi_2}{\Phi_1 + 0.154\Phi_2}$$

$$\left(t_j - \frac{23\Phi_1 + 17.39\Phi_2}{\Phi_1 + 0.154\Phi_2} \right) + (35 - t_j) \times \frac{6.924\Phi_1}{\Phi_1 + 0.154\Phi_2} \times \frac{EER_2}{EER_1}$$

$$(\Phi_{\text{haf}}(t_j) < L_c(t_j) \leq \Phi_{\text{ful}}(t_j)) \quad (6)$$

$$P(t_j) = P_1(0.498 - 0.0143t_j)$$

$$(\Phi_{\text{ful}}(t_j) < L_c(t_j)) \quad (7)$$

式中: $L_c(t_j)$ 为制冷季节房间热负荷, W; Φ_i 为不同工况下的换热能力, 下标 i 取 1~6 时分别表示额定制冷、中间制冷、额定制热、中间制热、低温制热、最小制冷工况, W; P_i 为不同工况下的换热能耗, W; EER_i 为不同制冷工况下的能效比; $\Phi_{\min}(t_j)$ 、 $\Phi_{\text{haf}}(t_j)$ 、 $\Phi_{\text{ful}}(t_j)$ 分别为最小、中间、额定制冷能力, W。

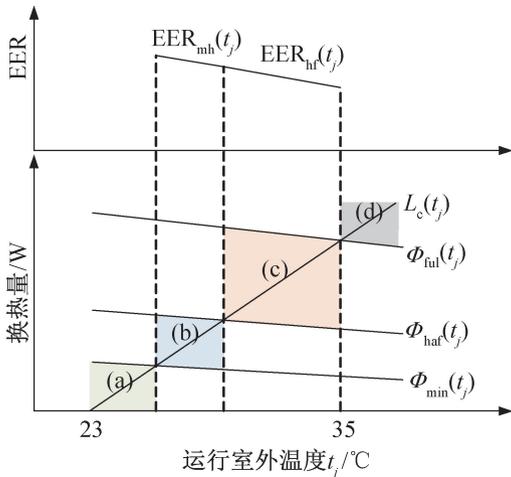


图 1 房间热负荷与制冷能力大小关系

Fig.1 Relationship between room heat load and refrigerating capacity

2.3.2 CSTE 化简结果进一步显式化的思路

由式(3)~式(7)计算 7 测试工况点 CSTE, 仍包含 5 个方程, 未达到用 1 个公式显式计算 CSTE 的目的, 因此还需进一步简化。拟采用的方法为: 先分析获得原 CSTE 计算公式中与 CSTE 最直接相关的变量, 然后将 CSTE 拟合为这些相关变量的单个函数。

分析上述简化的 7 测试工况点 CSTE 计算公式可知, 式(4)为最小制冷能耗 P_6 与一个以 Φ_6/Φ_1 为变量的系数的乘积; 式(5)为中间制冷能耗 P_2 与一个以 Φ_6/Φ_1 、 Φ_2/Φ_1 、 EER_6/EER_2 为变量的系数的乘

积; 式(6)为额定制冷能耗 P_1 与一个以 Φ_2/Φ_1 、 EER_2/EER_1 为变量的系数的乘积; 式(7)为额定制冷能耗 P_1 与一个固定系数的乘积。可知, 无论 $P(t_j)$ 选择式(4)~式(7)中的哪一个进行计算, 最终获得的 CSTE 一定是“最小制冷能耗 P_6 与一个以 Φ_6/Φ_1 为变量的系数的乘积”、“中间制冷能耗 P_2 与一个以 Φ_6/Φ_1 、 Φ_2/Φ_1 、 EER_6/EER_2 为变量的系数的乘积”、“额定制冷能耗 P_1 与一个以 Φ_2/Φ_1 、 EER_2/EER_1 为变量的系数的乘积”之和。因此, 将 7 测试工况点 CSTE 拟合为关于最小制冷能耗 P_6 、额定制冷能耗 P_1 和中间制冷能耗 P_2 的单个函数, 从而省去从 4 个 $P(t_j)$ 功耗计算公式中进行判断与选择的步骤, 其拟合形式如式(8)所示。

$$CSTE_{\text{fit},7\text{测试工况}} = P_2 \left(c \frac{\Phi_2}{\Phi_1} + d \frac{\Phi_6}{\Phi_1} + e \frac{EER_6}{EER_2} + f \right) + P_6 \left(a \frac{\Phi_6}{\Phi_1} + b \right) + P_1 \left(g \frac{\Phi_2}{\Phi_1} + h \frac{EER_2}{EER_1} + i \right) \quad (8)$$

式中: $a \sim i$ 为拟合系数。

2.3.3 基于拟合的 CSTE 显式表达式

通过调研得到的额定制冷量大于 7.1 kW 的变频空调器常见制冷测试工况性能参数范围如附录表 A-1 所示^[17-20]。采用 50 组满足附录表 A-1 中范围的空调器能力、能效数据来拟合式(8)中的待定系数, 可获得 7 测试工况点 CSTE 关于额定制冷功耗 P_1 、中间制冷功耗 P_2 和最小制冷功耗 P_6 的显式表达式, 如式(9)所示。

$$CSTE_{\text{fit},7\text{测试工况}} = P_6 \left(-180.05 \frac{\Phi_6}{\Phi_1} + 265.32 \right) + P_2 \left(-448.98 \frac{\Phi_2}{\Phi_1} - 303.72 \frac{\Phi_6}{\Phi_1} - 51.27 \frac{EER_6}{EER_2} + 835.17 \right) + P_1 \left(-276.78 \frac{\Phi_2}{\Phi_1} - 37.44 \frac{EER_2}{EER_1} + 445.82 \right) \quad (9)$$

2.3.4 CSTE 显式表达式的误差计算

7 测试工况点 CSTE 的显式表达式的拟合误差可

通过对比 CSTE 显式表达式(9)与国标中 CSTE 定义式的计算结果的偏差来获得。通过本文提出的计算式(9)以及国标中的定义式,分别对 50 组空调器性能数据的 CSTE 进行计算,与国标定义式的偏差在 $\pm 0.07\%$ 以内。

2.4 HSTE 显式表达式的推导

为获得可直接计算的 7 测试工况点 HSTE 显式表达式,首先对国标的 HSTE 定义式进行推导化简,然后对 HSTE 简化计算式中无法直接计算的部分进行近似拟合处理。

2.4.1 根据国标定义式推导的 HSTE 化简结果

国标中 7 测试工况点 HSTE 计算共需用到 40 个公式(国标中式 A. 45~A. 51、A. 58~A. 90^[6]),较为复杂。

将国标中的式 A. 45~A. 51、A. 58~A. 90^[6]代入 HSTE 定义式并化简得到简化的 7 测试工况点

HSTE 计算式,但仍需 9 个方程,如式(10)~式(18)所示。式(10)中功耗 $P(t_j)$ 的计算需根据房间热负荷 $L_h(t_j)$ 与各制热工况能力 $\Phi_i(t_j)$ 的大小关系(图 2)选用相应的方程;式(11)~式(18)对应的运行条件标注于公式编号前。

$$HSTE_{7\text{测试工况}} = \sum_{j=1}^{26} P(t_j) \times n_j \quad (10)$$

$$P(t_j) = P_7 \times \frac{(1.025 - 0.060 \ 3t_j)(0.012 \ 9t_j + 0.91)}{(0.019t_j + 0.615) \Phi_7 / \Phi_1 + (0.256 - 0.015t_j) (L_h(t_j) \leq \Phi_{\min}(t_j))} \quad (11)$$

$$P(t_j) = P_7 \times \frac{(1.025 - 0.060 \ 3t_j)(0.007t_j + 0.869)}{(0.011 \ 5t_j + 0.56) \Phi_7 / \Phi_1 + (0.256 - 0.015t_j) (L_h(t_j) \leq \Phi_{\min,r}(t_j))} \quad (12)$$

$$P(t_j) = P_4 \times$$

$$\frac{(1.025 - 0.060 \ 3t_j) \left(\frac{102.5\Phi_1 - 82\Phi_7}{6.03\Phi_1 + 2.57\Phi_7} - \frac{102.5\Phi_1 - 82\Phi_4}{6.03\Phi_1 + 2.57\Phi_4} \right) \times \frac{\Phi_1}{\Phi_4}}{\frac{7.58\Phi_1}{6.81\Phi_1 + 1.28\Phi_4} \times \left(\frac{102.5\Phi_1 - 82\Phi_7}{6.03\Phi_1 + 2.57\Phi_7} - t_j \right) + \frac{7.58\Phi_1}{6.81\Phi_1 + 1.28\Phi_7} \times \frac{COP_7}{COP_4} \times \left(t_j - \frac{102.5\Phi_1 - 82\Phi_4}{6.03\Phi_1 + 2.57\Phi_4} \right)} (\Phi_{\min}(t_j) < L_h(t_j) \leq \Phi_{\text{haf}}(t_j)) \quad (13)$$

$$P(t_j) = P_4 \times$$

$$\frac{(1.025 - 0.060 \ 3t_j) \left(\frac{102.5\Phi_1 - 74.7\Phi_7}{6.03\Phi_1 + 1.53\Phi_7} - \frac{102.5\Phi_1 - 74.7\Phi_4}{6.03\Phi_1 + 1.53\Phi_4} \right) \times \frac{\Phi_1}{\Phi_4}}{\frac{60.7\Phi_1}{59.6\Phi_1 + 8.1\Phi_4} \times \left(\frac{102.5\Phi_1 - 74.7\Phi_7}{6.03\Phi_1 + 1.53\Phi_7} - t_j \right) + \frac{60.7\Phi_1}{59.6\Phi_1 + 8.1\Phi_7} \times \frac{COP_7}{COP_4} \times \left(t_j - \frac{102.5\Phi_1 - 74.7\Phi_4}{6.03\Phi_1 + 1.53\Phi_4} \right)} (\Phi_{\min,r}(t_j) < L_h(t_j) \leq \Phi_{\text{haf,r}}(t_j)) \quad (14)$$

$$P(t_j) = P_3 \times$$

$$\frac{(1.025 - 0.060 \ 3t_j) \left(\frac{102.5\Phi_1 - 82\Phi_4}{6.03\Phi_1 + 2.57\Phi_4} - \frac{102.5\Phi_1 - 82\Phi_3}{6.03\Phi_1 + 2.57\Phi_3} \right) \times \frac{\Phi_1}{\Phi_3}}{\frac{7.58\Phi_1}{6.81\Phi_1 + 1.28\Phi_3} \times \left(\frac{102.5\Phi_1 - 82\Phi_4}{6.03\Phi_1 + 2.57\Phi_4} - t_j \right) + \frac{7.58\Phi_1}{6.81\Phi_1 + 1.28\Phi_4} \times \frac{COP_4}{COP_3} \times \left(t_j - \frac{102.5\Phi_1 - 82\Phi_3}{6.03\Phi_1 + 2.57\Phi_3} \right)} (\Phi_{\text{haf}}(t_j) < L_h(t_j) \leq \Phi_{\text{ful}}(t_j)) \quad (15)$$

$$P(t_j) = P_3 \times$$

$$\frac{(1.025 - 0.060 \ 3t_j) \left(\frac{102.5\Phi_1 - 74.7\Phi_4}{6.03\Phi_1 + 1.53\Phi_4} - \frac{102.5\Phi_1 - 74.7\Phi_3}{6.03\Phi_1 + 1.53\Phi_3} \right) \times \frac{\Phi_1}{\Phi_3}}{\frac{60.7\Phi_1}{59.6\Phi_1 + 8.1\Phi_3} \times \left(\frac{102.5\Phi_1 - 74.7\Phi_4}{6.03\Phi_1 + 1.53\Phi_4} - t_j \right) + \frac{60.7\Phi_1}{59.6\Phi_1 + 8.1\Phi_4} \times \frac{COP_4}{COP_3} \times \left(t_j - \frac{102.5\Phi_1 - 74.7\Phi_3}{6.03\Phi_1 + 1.53\Phi_3} \right)} (\Phi_{\text{haf,r}}(t_j) < L_h(t_j) \leq \Phi_{\text{ful,r}}(t_j)) \quad (16)$$

$$P(t_j) = P_5 \times$$

$$(1.025 - 0.060 3t_j) \left(\frac{102.5\Phi_1 - 74.7\Phi_3}{6.03\Phi_1 + 1.53\Phi_3} - \frac{102.5\Phi_1 - 96.1\Phi_5}{6.03\Phi_1 + 1.98\Phi_5} \right) \times \frac{\Phi_1}{\Phi_5}$$

$$\frac{78.1\Phi_1}{67.4\Phi_1 + 12\Phi_5} \times \left(\frac{102.5\Phi_1 - 74.7\Phi_3}{6.03\Phi_1 + 1.53\Phi_3} - t_j \right) + \frac{60.7\Phi_1}{59.6\Phi_1 + 8.1\Phi_3} \times \frac{\text{COP}_3}{\text{COP}_5} \times \left(t_j - \frac{102.5\Phi_1 - 96.1\Phi_5}{6.03\Phi_1 + 1.98\Phi_5} \right)$$

$$(\Phi_{\text{ful},f}(t_j) < L_h(t_j) \leq \Phi_{\text{ext},f}(t_j)) \quad (17)$$

$$P(t_j) = P_5(0.007 82t_j + 0.984) + \Phi_1(1.025 - 0.060 3t_j) - \Phi_5(0.019 8t_j + 0.961)$$

$$(\Phi_{\text{ext},f}(t_j) < L_h(t_j)) \quad (18)$$

式中： $L_h(t_j)$ 为制热季节房间热负荷，W； $\Phi_{\text{min}}(t_j)$ 为最小制热能力，W； $\Phi_{\text{haf}}(t_j)$ 为中间制热能力，W； $\Phi_{\text{ful}}(t_j)$ 为额定制热能力； $\Phi_{\text{ext},f}(t_j)$ 为低温制热能力，W； COP_i 为不同制热工况下的能效比，下标取 7 表示最小制热工况，下标取 1~6 时表示的工况与前文相同； P_i 为不同工况下的功耗，W，下标 i 表示的工况与前文相同； f 表示结霜区域，不带 f 表示处于非结霜区域运行。

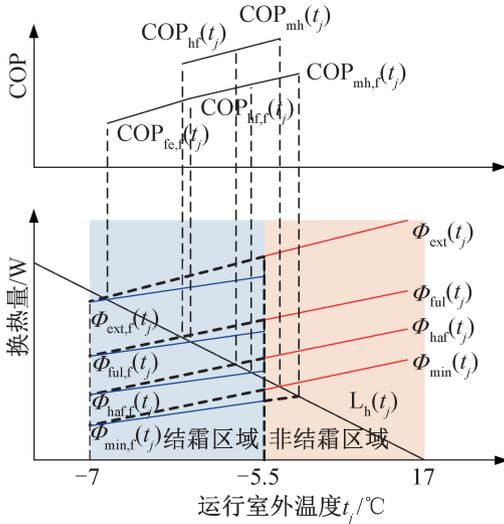


图 2 房间热负荷与制热能力大小关系

Fig.2 Relationship between room heat load and heating capacity

2.4.2 HSTE 化简结果进一步显式化的思路

由式(10)~式(18)计算 7 测试工况点 HSTE,仍包含 9 个方程,未达到用 1 个公式显式计算 HSTE 的目的,因此还需进一步简化。拟采用的方法为:先分析获得原 HSTE 计算公式中与 HSTE 最直接相关的变量,然后将 HSTE 拟合为这些相关变量的单个函数。

分析上述简化的 7 测试工况点 HSTE 计算公式可知,式(11)、式(12)为 P_7 与一个以 Φ_7/Φ_1 为变量的系数的乘积;式(13)、式(14)为 P_4 与一个以 Φ_7/Φ_1 、 Φ_4/Φ_1 与 $\text{COP}_7/\text{COP}_4$ 为变量的系数的乘积;式(15)、式(16)为 P_3 与一个以 Φ_4/Φ_1 、 Φ_3/Φ_1 与 $\text{COP}_4/\text{COP}_3$ 为变量的系数的乘积;式(17)为 P_5 与一个以 Φ_5/Φ_1 、 Φ_3/Φ_1 与 $\text{COP}_3/\text{COP}_5$ 为变量的系数的

乘积;式(18)为 P_5 、 Φ_1 、 Φ_5 分别与一个固定系数的乘积。可以看出,无论 $P(t_j)$ 选择式(11)~式(18)中的哪一个进行计算,最终获得的 HSTE 一定是“ P_7 与一个以 Φ_7/Φ_1 为变量的系数的乘积”、“ P_4 与一个以 Φ_7/Φ_1 、 Φ_4/Φ_1 与 $\text{COP}_7/\text{COP}_4$ 为变量的系数的乘积”、“ P_3 与一个以 Φ_4/Φ_1 、 Φ_3/Φ_1 与 $\text{COP}_4/\text{COP}_3$ 为变量的系数的乘积”、“ P_5 与一个以 Φ_5/Φ_1 、 Φ_3/Φ_1 与 $\text{COP}_3/\text{COP}_5$ 为变量的系数的乘积”、“ Φ_1 与常数的乘积”以及“ Φ_5 与常数的乘积”之和。因此将 HSTE 拟合为关于 P_7 、 P_4 、 P_3 、 P_5 、 Φ_1 和 Φ_5 的单个函数,从而省去从 8 个 $P(t_j)$ 功耗计算公式中进行判断与选择的步骤,其拟合形式如式(19)所示。

2.4.3 基于拟合的 HSTE 显式表达式

通过调研得到的额定制冷量 >7.1 kW 的变频空调器常见制热测试工况性能参数范围如附录表 A-1 所示^[17-20]。采用 50 组满足附录表 A-1 中范围的空调器能力、能效数据来拟合公式(19)中的待定系数,可获得 7 测试工况点 HSTE 关于最小制热能耗 P_7 、中间制热能耗 P_4 、额定制热能耗 P_3 、低温制热能耗 P_5 、额定制冷能力 Φ_1 和低温制冷能力 Φ_5 的显式表达式,如式(20)所示。

$$\text{HSTE}_{\text{fit},7\text{测试工况}} = P_7 \left(a \frac{\Phi_7}{\Phi_1} + b \right) +$$

$$P_4 \left[c \left(\frac{\Phi_7}{\Phi_1} \right)^2 + d \frac{\Phi_7}{\Phi_1} + e \left(\frac{\Phi_4}{\Phi_1} \right)^2 + f \frac{\Phi_4}{\Phi_1} + g \frac{\text{COP}_7}{\text{COP}_4} + h \right] +$$

$$P_3 \left[i \left(\frac{\Phi_4}{\Phi_1} \right)^2 + j \frac{\Phi_4}{\Phi_1} + k \left(\frac{\Phi_3}{\Phi_1} \right)^2 + l \frac{\Phi_3}{\Phi_1} + m \frac{\text{COP}_4}{\text{COP}_3} + n \right] +$$

$$P_5 \left[o \left(\frac{\Phi_3}{\Phi_1} \right)^2 + p \frac{\Phi_3}{\Phi_1} + q \left(\frac{\Phi_5}{\Phi_1} \right)^2 + r \frac{\Phi_5}{\Phi_1} + s \frac{\text{COP}_3}{\text{COP}_5} + t \right] +$$

$$u\Phi_1 + v\Phi_5 \quad (19)$$

2.4.4 HSTE 显式表达式的误差计算

7 测试工况点 HSTE 显式表达式的拟合误差可通过对比 HSTE 显式表达式(20)与国标中 HSTE 定义式的计算结果的偏差获得。通过本文提出的计算式(20)以及国标中的定义式,分别对 50 组空调器性能数据的 HSTE 进行计算,与国标定义式的偏差在 $\pm 1.10\%$ 以内。

2.5.7 测试工况点 APF 显式表达式

将化简得到的 4 个 APF 中间变量 CSTE、HSTE、CSTL、HSTL 显式表达式(1)、式(2)、式(9)、

式(20)代入 APF 义式中,得到用于额定制冷量 ≤ 7.1 kW 的变频空调器的 APF 显式计算式,如式(21)所示。

$$\begin{aligned}
 \text{HSTE}_{\text{fit},7\text{测试工况}} &= P_7 \left(2\,202.10 \frac{\Phi_7}{\Phi_1} - 978.48 \right) + 63.70\Phi_1 - 53.80\Phi_5 + \\
 &P_4 \left[-2\,223.20 \left(\frac{\Phi_7}{\Phi_1} \right)^2 + 786.99 \frac{\Phi_7}{\Phi_1} - 8\,108.28 \left(\frac{\Phi_4}{\Phi_1} \right)^2 + 10\,699.22 \frac{\Phi_4}{\Phi_1} - 143.20 \frac{\text{COP}_7}{\text{COP}_4} - 3\,109.83 \right] + \\
 &P_3 \left[3\,441.94 \left(\frac{\Phi_4}{\Phi_1} \right)^2 - 4\,698.75 \frac{\Phi_4}{\Phi_1} + 580.41 \left(\frac{\Phi_3}{\Phi_1} \right)^2 - 1\,474.64 \frac{\Phi_3}{\Phi_1} - 25.93 \frac{\text{COP}_4}{\text{COP}_3} + 2\,600.37 \right] + \\
 &P_5 \left[-301.06 \left(\frac{\Phi_3}{\Phi_1} \right)^2 + 670.97 \frac{\Phi_3}{\Phi_1} + 181.13 \left(\frac{\Phi_5}{\Phi_1} \right)^2 - 493.78 \frac{\Phi_5}{\Phi_1} - 71.15 \frac{\text{COP}_3}{\text{COP}_5} + 205.60 \right] \quad (20)
 \end{aligned}$$

$$\left\{ \begin{aligned}
 \text{APF}_{\text{fit}} &= \frac{954.21}{A+B} \\
 A &= \frac{P_6}{\Phi_1} \times \left(-180.05 \frac{\Phi_6}{\Phi_1} + 265.32 \right) + \frac{P_2}{\Phi_1} \times \left(-448.98 \frac{\Phi_2}{\Phi_1} - 303.72 \frac{\Phi_6}{\Phi_1} - 51.27 \frac{\text{EER}_6}{\text{EER}_2} + 835.17 \right) + \\
 &\frac{P_1}{\Phi_1} \times \left(-276.78 \frac{\Phi_2}{\Phi_1} - 37.44 \frac{\text{EER}_2}{\text{EER}_1} + 445.82 \right) \\
 B &= \frac{P_7}{\Phi_1} \times \left(2\,202.10 \frac{\Phi_7}{\Phi_1} - 978.48 \right) + 63.70 - 53.80 \frac{\Phi_5}{\Phi_1} + \frac{P_4}{\Phi_1} \times \left[-2\,223.20 \left(\frac{\Phi_7}{\Phi_1} \right)^2 + 786.99 \frac{\Phi_7}{\Phi_1} - \right. \\
 &8\,108.28 \left(\frac{\Phi_4}{\Phi_1} \right)^2 + 10\,699.22 \frac{\Phi_4}{\Phi_1} - 143.20 \frac{\text{COP}_7}{\text{COP}_4} - 3\,109.83 \left. \right] + \frac{P_3}{\Phi_1} \times \left[3\,441.94 \left(\frac{\Phi_4}{\Phi_1} \right)^2 - \right. \\
 &4\,698.75 \frac{\Phi_4}{\Phi_1} + 580.41 \left(\frac{\Phi_3}{\Phi_1} \right)^2 - 1\,474.64 \frac{\Phi_3}{\Phi_1} - 25.93 \frac{\text{COP}_4}{\text{COP}_3} + 2\,600.37 \left. \right] + \frac{P_5}{\Phi_1} \times \left[-301.06 \left(\frac{\Phi_3}{\Phi_1} \right)^2 + \right. \\
 &670.97 \frac{\Phi_3}{\Phi_1} + 181.13 \left(\frac{\Phi_5}{\Phi_1} \right)^2 - 493.78 \frac{\Phi_5}{\Phi_1} - 71.15 \frac{\text{COP}_3}{\text{COP}_5} + 205.60 \left. \right]
 \end{aligned} \right. \quad (21)$$

3 开发 5 测试工况 APF 显式表达式

获取额定制冷量 ≤ 7.1 kW 空调器的 APF 需要测试 5 个工况的性能参数,省去了最小制冷与最小制热两个工况。

3.1 CSTL 与 HSTL 的显式表达式

根据国标的定义,季节制冷量 CSTL 与季节制热量 HSTL 的计算方法与最小制冷、最小制热两个工况无关,因此 5 测试工况 CSTL 与 HSTL 显式表达式的推导结果与 7 测试工况的推导结果相同,如式(1)和式(2)所示。

3.2 用于 5 测试工况点的 CSTE 显式表达式

采用与 7 测试工况点类似的思路,即先对国标的 CSTE 定义式进行推导化简,然后对简化计算式中无法直接计算的部分进行近似拟合处理。

国标中 5 测试工况点 CSTE 的计算共需要用到 12 个公式(国标中式 A.10~A.21^[6]),将其中 A.11~

A.21 代入式 A.10,化简得到 4 个方程。采用 40 组满足附录表 A-1 中范围的空调器能力、能效数据来拟合,可获得 5 测试工况点 CSTE 关于额定制冷功耗 P_1 和中间制冷功耗 P_2 的显式表达式,如式(22)所示。式(22)与国标定义式的偏差在 ±0.05% 以内。

3.3 用于 5 测试工况点的 HSTE 显式表达式

采用与 7 测试工况点类似的化简与拟合处理方法。国标中 5 测试工况点 HSTE 计算共需要用到 33 个公式(国标中式 A.34、A.45~A.76^[6]),将 A.45~A.76^[6]代入 A.34,化简得到 7 个方程。采用 40 组满足附录表 A-1 中范围的空调器能力、能效数据来拟合,可获得 5 测试工况点 HSTE 关于中间制热能耗 P_4 、额定制热能耗 P_3 、低温制热能耗 P_5 、额定制冷能力 Φ_1 和低温制冷能力 Φ_5 的显式表达式,如式(23)所示。计算式(23)与国标定义式的偏差在 ±0.68% 以内。

3.4 5 测试工况点 APF 显式表达式

将化简得到的中间变量 CSTE、HSTE、CSTL、

HSTL 显式表达式 (1)、式 (2)、式 (22)、式 (23) kW 变频空调器的 APF 显式表达式, 如式 (24) 代入 APF 定义式中, 得到用于额定制冷量 ≤ 7.1 所示。

$$CSTE_{fit,5测试工况} = P_2 \left(-436.13 \frac{\Phi_2}{\Phi_1} + 811.51 \right) + P_1 \left(-312.96 \frac{\Phi_2}{\Phi_1} - 43.33 \frac{EER_2}{EER_1} + 479.56 \right) \quad (22)$$

$$HSTE_{fit,5测试工况} = P_4 \left[-4\,085.17 \left(\frac{\Phi_4}{\Phi_1} \right)^2 + 5\,489.17 \frac{\Phi_4}{\Phi_1} - 1\,825.80 \right] + 63.21\Phi_1 - 52.75\Phi_5 + P_3 \left[1\,085.90 \left(\frac{\Phi_4}{\Phi_1} \right)^2 - 1\,505.39 \frac{\Phi_4}{\Phi_1} + 62.05 \left(\frac{\Phi_3}{\Phi_1} \right)^2 - 49.82 \frac{\Phi_3}{\Phi_1} + 26.00 \left(\frac{COP_4}{COP_3} \right)^2 - 134.19 \frac{COP_4}{COP_3} + 511.80 \right] + P_5 \left[474.37 \left(\frac{\Phi_5}{\Phi_1} \right)^2 - 1\,312.76 \frac{\Phi_5}{\Phi_1} - 55.46 \left(\frac{\Phi_3}{\Phi_1} \right)^2 + 60.97 \frac{\Phi_3}{\Phi_1} + 153.26 \left(\frac{COP_3}{COP_5} \right)^2 - 598.96 \frac{COP_3}{COP_5} + 1\,725.65 \right] \quad (23)$$

$$\left\{ \begin{aligned} APF_{fit} &= \frac{954.21}{A+B} \\ A &= \frac{P_2}{\Phi_1} \times \left(-436.13 \frac{\Phi_2}{\Phi_1} + 811.51 \right) + \frac{P_1}{\Phi_1} \times \left(-312.96 \frac{\Phi_2}{\Phi_1} - 43.33 \frac{EER_2}{EER_1} + 479.56 \right) \\ B &= \frac{P_4}{\Phi_1} \times \left[-4\,085.17 \left(\frac{\Phi_4}{\Phi_1} \right)^2 + 5\,489.17 \frac{\Phi_4}{\Phi_1} - 1\,825.80 \right] + 63.21 - 52.75 \frac{\Phi_5}{\Phi_1} + \\ &\quad \frac{P_3}{\Phi_1} \times \left[1\,085.90 \left(\frac{\Phi_4}{\Phi_1} \right)^2 - 1\,505.39 \frac{\Phi_4}{\Phi_1} + 62.05 \left(\frac{\Phi_3}{\Phi_1} \right)^2 - 49.82 \frac{\Phi_3}{\Phi_1} + 26.00 \left(\frac{COP_4}{COP_3} \right)^2 - 134.19 \frac{COP_4}{COP_3} + 511.80 \right] + \\ &\quad \frac{P_5}{\Phi_1} \times \left[474.37 \left(\frac{\Phi_5}{\Phi_1} \right)^2 - 1\,312.76 \frac{\Phi_5}{\Phi_1} - 55.46 \left(\frac{\Phi_3}{\Phi_1} \right)^2 + 60.97 \frac{\Phi_3}{\Phi_1} + 153.26 \left(\frac{COP_3}{COP_5} \right)^2 - 598.96 \frac{COP_3}{COP_5} + 1\,725.65 \right] \end{aligned} \right. \quad (24)$$

4 新开发 APF 显式计算式的误差分析及与现有显式计算式的对比

4.1 新开发的 APF 显式计算式拟合误差分析

新开发的覆盖全部冷量范围的 APF 显式计算式, 包括式 (24) 和式 (21), 分别适用于 5 测试工况和 7 测试工况。

APF 显式计算式开发中, 经过代入消元与数值拟合, 其中数值拟合会带来误差, 出现在 CSTE 与 HSTE 的推导过程中。

由式 (25) 和式 (26) 可知, APF 显式计算式的最大误差可以用 CSTE 与 HSTE 的最大拟合误差来表示。由于 CSTE 和 HSTE 显式计算式的最大拟合误差前文已经给出, 将其代入式 (26) 即可得到 APF 的最大拟合误差。对于 5 测试工况点和 7 测试工况点, APF 显式计算式误差的最大分别为 0.73% 和 1.17%, 如表 2 所示。

$$\delta_{APF} = \left| \frac{APF_{fit} - APF}{APF} \right| \quad (25)$$

$$\delta_{APF} = \left| \frac{APF_{fit} - 1}{APF} \right| = \left| \frac{CSTE - CSTE_{fit} + HSTE - HSTE_{fit}}{CSTE_{fit} + HSTE_{fit}} \right| \quad (26)$$

$$< \delta_{CSTE} + \delta_{HSTE}$$

表 2 新开发的 APF 显式计算式的误差

Tab.2 Error of the newly developed APF explicit expressions %

误差项	CSTE	HSTE	APF
5 测试工况显式计算式	0.05	0.68	0.73
7 测试工况显式计算式	0.07	1.10	1.17

4.2 新开发的 APF 显式计算式与已有显式计算式的对比

用本文新开发的 APF 显式计算式, 与已有的 5 测试工况点 APF 显式表达式 (文献 [15] 中式 (15)) 对相同的空调器实测数据 (一组额定制冷量 ≤ 7.1 kW 的数据和一组额定制冷量 > 7.1 kW 数据) 进行计算, 并与根据 GB 21455—2019 中 APF 定义式计算得到的 APF 进行对比。输入的空调器性能参数数据如表 3 所示, 计算结果如表 4 所示。

如表 4 所示, 基于本文新开发的 5 测试工况 APF 显式计算式得到的 APF 值偏差仅为 0.16%。而基于已有的 APF 显式计算式偏差为 -5.91%, 误差较大; 这是因为已有的 APF 显式公式是根据修改前的 APF 计算方法推导得到的。基于本文新开发的 7 测试工况点 APF 显式计算式的 APF 误差仅为 0.71%; 而已有的 APF 显式计算式不能用于该情况计算。

表 3 空调器性能参数数据

Tab.3 Performance parameter of air conditioners

工况	额定制冷量范围			
	≤7.1 kW		>7.1 kW	
	能力/W	能耗/W	能力/W	能耗/W
额定制冷	3 500	897	7 270	2 350
中间制冷	1 750	337	3 708	863
额定制热	4 725	1 425	9 210	2 950
中间制热	2 410	485	4 605	1 180
低温制热	3 780	1 443	6 908	2 911
最小制冷	—	—	1 818	411
最小制热	—	—	2 312	529

表 4 APF 值计算结果对比

Tab.4 Comparison of APF calculation results

额定制冷量/kW	计算方法	APF	偏差/%
≤7.1	国家标准	4.222	0
	本文公式	4.219	-0.07
	参考文献[15]公式	4.527	7.22
>7.1	国家标准中的方法	3.514	0
	本文新开发公式	3.503	-0.32
	参考文献[15]公式	无法计算	

5 结论

为实现对不同额定制冷量的变频空调器 APF 进行快速计算、获得快速寻求 APF 最优值的目标函数,本文开发了 5 测试工况点 APF 显式表达式(用于额定制冷量≤7.1 kW 的变频空调器)与 7 测试工况点 APF 显式表达式(用于额定制冷量>7.1 kW 的变频空调器),得到结论如下:

1) 本文基于 GB 21455—2019 定义的 APF 计算方法,通过代入消元的方法得到 CSTL、HSTL 的显式表达式与 CSTE、HSTE 的简化表达式;根据 CSTE、HSTE 简化表达式的特点确定它们的拟合形式,并用空调器常见的性能参数拟合得到 CSTE、HSTE 的显式表达式;将这 4 个中间变量的显式表达式代入 APF 定义式中得到 APF 显式表达式。

2) 本文提出的 5 测试工况点 APF 显式表达式在空调器常见的性能参数范围内,计算误差在 0.73% 以内;本文提出的 7 测试工况点 APF 显式表达式在空调器常见的性能参数范围内,计算误差在 1.17% 以内;本文提出的 APF 显式表达式能够准确并快速计算 APF。

3) 已有的 5 测试工况点 APF 显式表达式对一组

实测数据进行计算的偏差为-5.91%,误差较大;在 GB 21455—2019 对 APF 计算方法进行修改之后,其已不再能用于计算变频空调器 APF。

附录 A

空调器常见性能参数范围

通过调研得到的空调器常见性能参数范围如附表 A-1 所示^[12-15]:

附表 A-1 空调器的常见性能参数范围^[17-20]

Tab.A-1 The range of common performance parameters of air conditioners^[17-20]

参数	变化范围	参数	变化范围
Φ_2/Φ_1	0.47~0.53	EER ₂ /EER ₁	1.25~1.60
Φ_3/Φ_1	1.15~1.45	COP ₄ /COP ₃	1.20~1.70
Φ_4/Φ_1	0.55~0.75	COP ₅ /COP ₃	0.60~0.90
Φ_5/Φ_1	0.85~1.30	EER ₆ /EER ₂	1.00~1.15
Φ_6/Φ_1	0.23~0.27	COP ₇ /COP ₄	1.00~1.20
Φ_7/Φ_1	0.27~0.37		

参考文献

- [1] 谭成斌,陈焕新. 房间空气调节器季节能效比的优化方法研究[J]. 家电科技, 2015(3): 26-29. (TAN Chengbin, CHEN Huanxin. Research on optimization methods of the seasonal energy efficiency ratio of room air-conditioners[J]. China Appliance Technology, 2015(3): 26-29.)
- [2] 贺常相,樊超超,韩丙龙,等. 基于提升变频房间空调器 APF 的室外换热器流路设计[J]. 制冷与空调(北京), 2019, 19(6): 92-98. (HE Changxiang, FAN Chaochao, HAN Binglong, et al. Flow path design of outdoor heat exchanger for improving APF of variable speed room air conditioner [J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2019, 19(6): 92-98.)
- [3] 熊硕,王铭坤. 关于房间空调器高效节能方法的探讨[J]. 机电工程技术, 2010, 39(7): 145-146, 197. (XIONG Shuo, WANG Mingkun. Air conditioner about improving energy efficiency[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2010, 39(7): 145-146, 197.)
- [4] 房间空气调节器: GB/T 7725—1996[S]. 北京: 中国标准出版社, 1996. (Room air conditioners: GB/T 7725—1996[S]. Beijing: Standards Press of China, 1996.)
- [5] 房间空气调节器: GB/T 7725—2004[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004. (Room air conditioners: GB/T 7725—2004[S]. Beijing: Standards Press of China, 2004.)
- [6] 房间空气调节器能效限定值及能效等级: GB 21455—2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019. (Minimum al-

- lowable values of the energy efficiency and energy efficiency grades for room air conditioners: GB 21455—2019[S]. Beijing: Standards Press of China, 2019.)
- [7] 王派, 李敏霞, 马一太, 等. 我国空调与热泵的能效和标准现状与分析[J]. 制冷学报, 2018, 39(3): 65-72. (WANG Pai, LI Minxia, MA Yitai, et al. Current situation and prospect of air conditioning and heat pump energy efficiency and standard in China[J]. Journal of Refrigeration, 2018, 39(3): 65-72.)
- [8] 冯利伟. 一种优化变频空调器 APF 指标的方法[J]. 家电科技, 2016(9): 75-77. (FENG Liwei. A method for optimizing APF of variable frequencies air-conditioner[J]. China Appliance Technology, 2016(9): 75-77.)
- [9] 秦存涛, 祁影霞, 胡祥江, 等. 关于提高家用空调 APF 能效的试验研究[C]//2014 年中国家用电器技术大会论文集. 2014: 209-214. (QIN Cuntao, QI Yingxia, HU Xiangjiang, et al. Experimental studies on promotion of household air-conditioning APF efficiency[C]//Proceedings of 2014 China Household Appliance Technology Conference. 2014:209-214.)
- [10] 李宗怀, 王新民. 变频空调器节能技术探讨[J]. 日用电器, 2012(3): 35-37. (LI Zonghuai, WANG Xinmin. Discussion on energy saving technology of variable frequency air conditioners [J]. Electrical Appliances, 2012(3): 35-37.)
- [11] 丁国良. 制冷空调装置的计算机仿真技术[J]. 科学通报, 2006, 51(9): 998-1010. (DING Guoliang. Computer simulation technology of refrigeration and air conditioner equipment [J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(9): 998-1010.)
- [12] 杨天, 吴静怡, 盐地纯夫, 等. EnergyPlus 中变频多联空调系统蒸发温度控制能耗仿真模块的开发与实验验证[J]. 制冷学报, 2011, 32(5): 25-30. (YANG Tian, WU Jingyi, SHIOCHI S, et al. Evaporation temperature control module development and experimental validation of variable refrigerant flow air conditioning system simulation in EnergyPlus [J]. Journal of Refrigeration, 2011, 32(5): 25-30.)
- [13] 刘建, 魏文建, 丁国良, 等. 对具有复杂流路布置的翅片管换热器的性能仿真与分析[J]. 化工学报, 2005, 56(1): 47-52. (LIU Jian, WEI Wenjian, DING Guoliang, et al. Numerical simulation and analysis of performance of fin-and-tube heat exchanger with complex circuit arrangement [J]. CIESC Journal, 2005, 56(1): 47-52.)
- [14] 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. (SHEN Jiamin. Development of APF performance matching algorithm and dynamic characteristic prediction of inverter air conditioner[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2019.)
- [15] 沈佳敏, 吴国明, 任滔, 等. 变频空调器最大 APF 指标的快速求解方法[J]. 制冷学报, 2019, 40(5): 83-89. (SHEN Jiamin, WU Guoming, REN Tao, et al. Quick prediction of maximum APF for inverter air conditioners [J]. Journal of Refrigeration, 2019, 40(5): 83-89.)
- [16] 吴国明, 任滔, 丁国良, 等. 由早期性能标准的指标计算定频房间空调器 APF 的方法[J]. 制冷学报, 2016, 37(3): 88-93. (WU Guoming, REN Tao, DING Guoliang, et al. A method to evaluate APF for room air conditioner with on/off compressor by using rated performance data[J]. Journal of Refrigeration, 2016, 37(3): 88-93.)
- [17] 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(北京), 2017, 17(11): 21-25. (ZHANG Haiyun, XU Dinghua, HANG Chenzhe, et al. Analysis on influence factors on APF for room air conditioner[J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2017, 17(11): 21-25.)
- [18] 张立智, 杨晓, 刘丙磊, 等. 提升热泵型变频空调器 APF 技术途径的试验研究[J]. 制冷与空调(北京), 2017, 17(8): 72-77. (ZHANG Lizhi, YANG Xiao, LIU Binglei, et al. Experimental study on technical approaches of APF promotion for heat pump frequency-conversion air conditioner[J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2017, 17(8): 72-77.)
- [19] 珠海格力电器股份有限公司. 格力变频空调器性能参数[EB/OL]. (2019-06-06) [2022-03-23]. <https://www.gree.com>. (Gree Electric Appliances, Inc. of Zhuhai Co., Ltd.. Parameter of variable frequency air conditioner of Gree[EB/OL]. (2019-06-06) [2022-03-23]. <https://www.gree.com>.)
- [20] 李皖皖, 王飞, 王海霞, 等. 变频空调器全年能效系数 APF 提升的理论研究[J]. 低温与超导, 2020, 48(6): 66-71. (LI Wanwan, WANG Fei, WANG Haixia, et al. Theoretical study on the improvement of annual energy efficiency coefficient APF of variable frequency air conditioners[J]. Cryogenics & Superconductivity, 2020, 48(6): 66-71.)

通信作者简介

丁国良,男,教授,博士,博士生导师,上海交通大学机械与动力工程学院,021-34206378,E-mail:gdling@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: gdling@sjtu.edu.cn. Research fields: simulation and optimization for refrigeration appliances and utilization of new refrigerants.