

文章编号:0253-4339(2019)05-0083-07

doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2019.05.083

变频空调器最大 APF 指标的快速求解方法

沈佳敏 吴国明 任滔 丁国良

(上海交通大学制冷与低温工程研究所 上海 200240)

摘要 变频空调能效采用全年性能系数(APF)指标后,空调器的测试工况点由 1 个增至 5 个,导致获得空调器最大 APF 所需的实验量大幅增加。本文提出一种快速求解变频空调最大 APF 的方法,能够根据一组测试数据,快速求解最大 APF,从而简化空调器的实验匹配工作。该方法首先将国家标准中复杂的 APF 隐式定义转化为简单的 APF 显式计算公式,作为优化计算的目标函数;根据国家标准规定和空调器结构参数的限制,得到优化计算的约束方程;通过优化计算得到变频空调 APF 的最大值和对应的 5 个工况能力能效组合。本文将该方法应用于一款典型的变频空调器中,示意了该方法的操作步骤,优化得到的 APF 比原始测量值提升了 6.37%。

关键词 空调能效标准;房间空调器;变频;APF;最优化求解

中图分类号:TB657.2; TU831

文献标识码:A

Quick Prediction of Maximum APF for Inverter Air Conditioners

Shen Jiamin Wu Guoming Ren Tao Ding Guoliang

(Institute of Refrigeration and Cryogenics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, 200240, China)

Abstract As annual performance factor (APF) becomes the energy efficiency index of inverter air conditioners, the amount of working conditions to be tested for each air conditioner has greatly increased from one to five, which means that experiment-based maximization of the energy efficiency index may result in too heavy experimental tasks. This study aims to introduce a method for maximizing the APF of an inverter air conditioner, which can calculate the maximum APF quickly according to a set of testing data. In this method, an APF explicit formula was deduced from complicated and implicit expressions in the Chinese Standards and was taken as the objective function for optimal calculation. Subsequently, the APF constraint equations were deduced according to the Chinese Standard and structural parameters of air conditioners and were taken as constraint conditions. Finally, an optimization algorithm is established for calculating the maximum APF and best combinations of capacity and energy efficiency of five working conditions. Moreover, an application example of a typical inverter air conditioner using the new method was provided, along with the operation steps, and the value of APF increased by 6.37% in comparison with the originally measured value.

Keywords energy efficiency index; room air conditioner; inverter; APF; optimal solution

变频空调器具有高效、节能和舒适的优点,已发展成家用空调器市场的主导产品^[1]。变频空调器能效采用 APF 指标衡量,其计算式由 GB/T 7725—2004 规定^[2]。变频空调器 APF 由额定制冷、中间制冷、额定制热、中间制热和低温制热 5 个工况下的能力、能效值计算得到,是一个具有 10 个自变量的函数^[3-4]。APF 定义式由国家标准中的隐式表达式给出。APF 各个变量之间存在相互关系,使 APF 最大值无法直接从 APF 定义式中获得^[5]。

目前主要采用多次重复实验的方法来获得空调器最大 APF^[6-7],进行多次空调器的整机实验,直至 APF 达到最大值^[8-9]。获得一个 APF 需要实验测得

5 个工况的能力和能效数据,所以通过多次重复实验获得最大 APF 的方法所需的总实验次数极大。此外,该方法得到的最大 APF 是有限工况点下的最大 APF,并非理论上的 APF 全局最大值。

采用系统仿真方法获得最大 APF 可以减少实验次数,但仍需大量实验数据进行精度验证^[10-11]。系统仿真方法是通过国标性能约束和几何尺寸约束建立空调整机模型,并进行多次空调器的系统仿真,直至 APF 达到最大值。空调器在 APF 5 个测试工况下的运行特性差异很大,如环境温度、蒸发温度、冷凝温度、压缩机的压缩比^[12-13],导致空调器整机模型精度验证十分复杂。

目前还没有一种简单快速地求解变频空调器最大 APF 的方法。快速求解空调器的最大 APF 存在两个困难:1) 国标中 APF 定义式是隐式的,无法直接用优化算法求解最大 APF;2) 空调器 5 个工况之间存在相互联系,能力和能效的值也受到约束,将每个工况单独匹配到最优并不能使 APF 最大^[14-15]。

本文提出一种多约束条件下的寻优方法,可快速求解出最大 APF。

1 快速求解最大 APF 的方法

快速求解 APF 最大值的思路是以 APF 公式作为目标函数,以国标性能约束和几何尺寸约束作为约束方程,采用多约束条件寻优法求解。

快速求解 APF 最大值的步骤如下:1) 将国标中复杂的 APF 隐式定义式转化为简单的 APF 显示计算公式;2) 根据国标中的限制和空调器几何尺寸的约束,推导 APF 各个自变量的相互约束方程;3) 联立目标函数与约束条件,采用多约束条件寻优法求解得到 APF 最大值,如式(1)、式(2)所示。

$$APF_{\max} = f(\phi_{cr}, \phi_{cm}, \phi_{hr}, \phi_{hm}, \phi_{def}, EER_{cr}, EER_{cm}, COP_{hr}, COP_{hm}, COP_{def}) \quad (1)$$

$$s.t. \begin{cases} \phi_{\text{半工况}} = h(\phi_{\text{全工况}}) \\ EER_{cr} = g_1(\phi_{cr}) \\ EER_{cm} = g_2(\phi_{cm}) \\ COP_{hr} = g_3(\phi_{hr}) \\ COP_{hm} = g_4(\phi_{hm}) \\ COP_{def} = g_5(\phi_{def}) \end{cases} \quad (2)$$

2 APF 目标函数显式公式推导

为提升 APF 的计算速度,首先需要解决隐式方程迭代计算速度过慢的问题,需要将 APF 的原始隐式定义式转化为显式公式;其次应尽可能简化表达式,以进一步提升计算速度。

2.1 国标中的 APF 隐式定义式

APF 是指空调器在制冷季节和制热季节期间,从室内空气中除去的冷量与送入室内热量的总和与同期间内耗电量的总和之比,定义式由 GB/T 7725—2004 给出,如式(3)所示。CSTL 为制冷季节总负荷,Wh;HSTL 为制热季节总负荷,Wh;CSTE 为

制冷季节耗电量,Wh;HSTE 为制热季节耗电量,Wh。这 4 个变量的定义分别由式(4)~式(7)确定,计算过程中的其余变量由 GB/T 7725—2004 给出。

$$APF = \frac{CSTL + HSTL}{CSTE + HSTE} \quad (3)$$

$$CSTL = \sum_{j=1}^{12} n_j BL_c(t_j) + \sum_{j=13}^{15} n_j \phi_{cr2}(t_j) \quad (4)$$

$$HSTL = \sum_{j=1}^{23} n_j BL_h(t_j) \quad (5)$$

$$CSTE = \sum_{j=1}^k P_{clm}(t_j) + \sum_{j=k+1}^{12} P_{cm2}(t_j) + \sum_{j=13}^{15} P_{c2}(t_j) \quad (6)$$

$$HSTE = \sum_{j=1}^{26} n_j P_h(t_j) + \sum_{j=1}^{26} P_{RH}(t_j) \quad (7)$$

式中: t_j 为室外温度,℃; n_j 为各个室外温度的小时数,h; $\phi_{cr2}(t_j)$ 为空调器的制冷能力,W; P_{c2} 为额定耗电量,W; $BL_c(t_j)$ 为建筑冷负荷,W; $BL_h(t_j)$ 为建筑热负荷,W; $P_h(t_j)$ 为制热运行耗电量,W; $P_{RH}(t_j)$ 为辅助电加热量,W。

2.2 APF 隐式公式的显式化推导

根据国家标准定义的 APF 计算方法,需要利用大量公式,非常繁杂。其中 CSTL、HSTL、CSTE 和 HSTE 的表达式是隐式的,计算中需要反复迭代,增加了计算量。因此需要将 APF 的隐式定义式转化为显式计算式。

转换成显式计算式的思路是,先通过消元将 APF 计算式中的隐式变量 CSTL、HSTL、CSTE 和 HSTL 分别推导为显式表达式,然后将这些显式表达式带入 APF 定义式。

转换过程主要步骤为:将国标中 $\phi_{cr2}(t_j)$ 和 $BL_c(t_j)$ 的公式代入式(4),得到 CSTE 关于额定制冷量的函数,如式(8)所示;将国标中 $BL_h(t_j)$ 的公式代入式(5),得到 HSTL 关于额定制冷量的函数,如式(9)所示;将国标中 $P_{clm}(t_j)$ 、 $P_{cm2}(t_j)$ 和 $P_{c2}(t_j)$ 的公式代入式(6),得到 CSTE 的显式公式,如式(10)所示;将国标中 $P_h(t_j)$ 、 $P_{RH}(t_j)$ 的公式代入式(7),得到 HSTE 的显式公式,如式(11)所示。

$$CSTL = 626.67\phi_{cr} \quad (8)$$

$$HSTL = 368.29\phi_{cr} \quad (9)$$

$$CSTE = 29.54P_{c2} + \sum_{j=1}^6 \frac{13.848(t_j - 23)n_j P_{cm} \frac{\phi_{cr2a}}{\phi_{cr2a} + 0.154\phi_{crm}}}{16.725 \left(\frac{23\phi_{cr2a} + 17.39\phi_{crm}}{\phi_{cr2a} + 0.154\phi_{crm}} - t_j \right) + \frac{83.088\phi_{cr2a}(t_j - 23)}{4.968\phi_{cr2a} + 1.956\phi_{crm}}}$$

$$\sum_{j=7}^{12} \frac{(t_j - 23)n_j P_{c2} \frac{\phi_{cr2a} - \phi_{crm}}{\phi_{cr2a} + 0.154 \phi_{crm}} \frac{EER_{cr2a}}{EER_{crm}}}{(t_j - \frac{23\phi_{cr2a} + 17.39\phi_{crm}}{\phi_{cr2a} + 0.154 \phi_{crm}}) \frac{EER_{cr2}}{EER_{crm}} + \frac{6.924 \phi_{cr2a} (35 - t_j)}{4.968 \phi_{cr2a} + 1.956 \phi_{crm}}} \quad (10)$$

$$HSTE = \sum_{j=1}^k n_j [0.067\phi_{cr2a}(17 - t_j) - \phi_{def}(0.95668 + 0.021662t_j)] +$$

$$\sum_{j=1}^p \frac{0.067(17 - t_j)n_j\phi_{cr2a}(\frac{113.98\phi_{cr2a} - 74.423\phi_{hr2}}{6.7\phi_{cr2a} + 1.685\phi_{hr2}} - \frac{113.98\phi_{cr2a} - 95.67\phi_{def}}{6.7\phi_{cr2a} + 2.166\phi_{def}})}{\frac{88.786\phi_{cr2a}}{75.88\phi_{cr2a} + 12.84\phi_{def}} \frac{\phi_{def}}{P_{def}} (\frac{113.98\phi_{cr2a} - 74.423\phi_{hr2}}{6.7\phi_{cr2a} + 1.685\phi_{hr2}} - t_j) + \frac{69.07\phi_{cr2a}}{66.99\phi_{cr2a} + 8.8125\phi_{hr2}} \frac{\phi_{hr2}}{P_{hr2}} (t_j - \frac{113.98\phi_{cr2a} - 95.67\phi_{def}}{6.7\phi_{cr2a} + 2.166\phi_{def}})} +$$

$$\sum_{j=p+1}^l \frac{0.067(17 - t_j)n_j\phi_{cr2a}(\frac{113.98\phi_{cr2a} - 74.423\phi_{hrm}}{6.7\phi_{cr2a} + 1.685\phi_{hrm}} - \frac{113.98\phi_{cr2a} - 74.423\phi_{hr2}}{6.7\phi_{cr2a} + 1.685\phi_{hr2}})}{\frac{69.07\phi_{cr2a}}{66.99\phi_{cr2a} + 8.8125\phi_{hr2}} \frac{\phi_{hr2}}{P_{hr2}} (\frac{113.98\phi_{cr2a} - 74.423\phi_{hrm}}{6.7\phi_{cr2a} + 1.685\phi_{hrm}} - t_j) + \frac{69.07\phi_{cr2a}}{66.99\phi_{cr2a} + 8.8125\phi_{hrm}} \frac{\phi_{hrm}}{P_{hrm}} (t_j - \frac{113.98\phi_{cr2a} - 74.423\phi_{hr2}}{6.7\phi_{cr2a} + 1.685\phi_{hr2}})} +$$

$$\sum_{j=l+1}^m \frac{0.067(17 - t_j)n_j\phi_{cr2a}(\frac{113.98\phi_{cr2a} - 81.94\phi_{hrm}}{6.7\phi_{cr2a} + 2.57\phi_{hrm}} - \frac{113.98\phi_{cr2a} - 81.94\phi_{hr2}}{6.7\phi_{cr2a} + 2.57\phi_{hr2}})}{\frac{84.27\phi_{cr2a}}{75.61\phi_{cr2a} + 12.87\phi_{hr2}} \frac{\phi_{hr2}}{P_{hr2}} (\frac{113.98\phi_{cr2a} - 81.94\phi_{hrm}}{6.7\phi_{cr2a} + 2.57\phi_{hrm}} - t_j) + \frac{84.27\phi_{cr2a}}{75.61\phi_{cr2a} + 12.87\phi_{hrm}} \frac{\phi_{hrm}}{P_{hrm}} (t_j - \frac{113.98\phi_{cr2a} - 81.94\phi_{hr2}}{6.7\phi_{cr2a} + 2.57\phi_{hr2}})} +$$

$$\sum_{j=m+1}^n \frac{0.067(17 - t_j)n_j\phi_{cr2a}(17 - \frac{113.98\phi_{cr2a} - 81.94\phi_{hrm}}{6.7\phi_{cr2a} + 2.57\phi_{hrm}})}{\frac{84.27\phi_{cr2a}}{75.61\phi_{cr2a} + 12.87\phi_{hrm}} \frac{\phi_{hrm}}{P_{hrm}} (17 - t_j) + \frac{1.114\phi_{hrm}}{P_{hrm}} (t_j - \frac{113.98\phi_{cr2a} - 81.94\phi_{hrm}}{6.7\phi_{cr2a} + 2.57\phi_{hrm}})} \quad (11)$$

最后将式(8)~式(11)带入式(3),得到 APF 的显式表达式,如式(12)所示。

$$APF = 991.29\phi_{cr2} / (CSSTE + HSTE) \quad (12)$$

2.3 APF 显式计算式简化

由式(12)给出的 APF 显式计算式,虽然比式(3)~式(7)组成的隐式计算式简单,但其中 CSSTE 和 HSTE 的表达式仍较复杂,还需进一步简化。

2.3.1 APF 显式计算简化的思路

简化的思路是首先将形式复杂的变量 CSSTE 和 HSTE 进行拟合,得到形式简单的 CSSTE_{fit} 和 HSTE_{fit},然后将 CSSTE_{fit} 和 HSTE_{fit} 代入 APF 显式计算式,得到简单的 APF 计算式。

2.3.2 变量 CSSTE 的拟合

变量 CSSTE 的拟合步骤如下:

1) 根据 CSSTE 的自变量的形式确定 CSSTE_{fit} 的拟合形式。CSSTE 的自变量包括 EER_{cr2}/EER_{crm} 和 P_{c2}。CSSTE 与 P_{c2} 成正比,且与 EER_{cr2}/EER_{crm} 的关系接近线性,如图 1 所示,即 CSSTE/P_{c2} 可以拟合成 EER_{cr2}/EER_{crm} 的线性函数。

2) 确定空调器各个自变量的变化范围。通过调研常用机型空调器的参数,EER_{cr2}/EER_{crm} 的变化范围为 0.6~1.0^[16]。

3) 利用数据点进行拟合,确定公式中的拟合系数,拟合结果如式(13)所示。

$$CSSTE_{fit} = P_{c2} [209.37 + 369.95 \frac{EER_{cr2}}{EER_{crm}}] \quad (13)$$

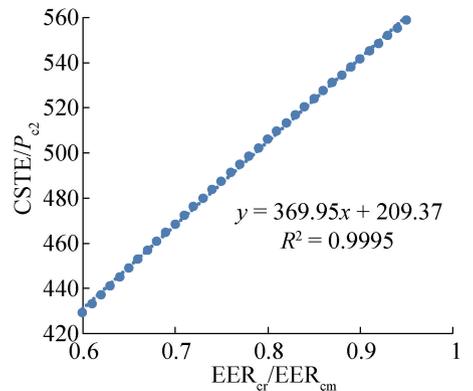


图 1 CSSTE/P_{c2} 在不同自变量下的取值
Fig.1 Variation of CSSTE/P_{c2} with EER_{cr}/EER_{crm}

2.3.3 变量 HSTE 的拟合

变量 HSTE 的拟合步骤如下:

1) 根据 HSTE 自变量的形式确定 HSTE_{fit} 拟合形式。HSTE 的自变量包括 P_{hr}、P_{hrm}、P_{def}、φ_{hr}/φ_{cr2}、φ_{def}/φ_{cr2}。HSTE 是关于变量 P_{hr}、P_{hrm}、P_{def} 的线性函数;P_{def} 的系数可用 φ_{hr}/φ_{cr2}、φ_{def}/φ_{cr2} 的二次多项式进行拟

合; P_{hr} 和 P_{hm} 的系数可用 ϕ_{hr}/ϕ_{cr2} 的二次多项式进行拟合。

2) 确定空调器各个自变量的变化范围。通过调研常用机型空调器的参数, ϕ_{def}/ϕ_{cr2} 的变化范围为 1.0~1.4, ϕ_{hr}/ϕ_{cr2} 的变化范围为 1.0~1.4, P_{hr} 的变化范围为 600~1 400 W, P_{def} 的变化范围为 1 300~1 600 W^[16]。

$$HSTE_{fit} = [1\ 570 - 1\ 400 \frac{\phi_{hr}}{\phi_{cr}} + 390(\frac{\phi_{hr}}{\phi_{cr}})^2 + 736 \frac{\phi_{def}}{\phi_{cr}} + 162(\frac{\phi_{def}}{\phi_{cr}})^2 + 215 \frac{\phi_{def}}{\phi_{cr}} \frac{\phi_{hr}}{\phi_{cr}}] P_{def} + [-3\ 692 + 6\ 743 \frac{\phi_{hr}}{\phi_{cr}} - 2\ 963(\frac{\phi_{hr}}{\phi_{cr}})^2] P_{hr} + [10\ 980 - 18\ 730 \frac{\phi_{hr}}{\phi_{cr}} + 8\ 108(\frac{\phi_{hr}}{\phi_{cr}})^2] P_{hm} \quad (14)$$

$$\left\{ \begin{aligned} APF &= \frac{991.29\phi_{cr2}}{A + B + C} \\ A &= [209.37 + 369.95 \frac{EER_{cr2}}{EER_{crm}}] P_{cr2} \\ B &= [1\ 570 - 1\ 400 \frac{\phi_{hr}}{\phi_{cr}} + 390(\frac{\phi_{hr}}{\phi_{cr}})^2 + 736 \frac{\phi_{def}}{\phi_{cr}} + 162(\frac{\phi_{def}}{\phi_{cr}})^2 + 215 \frac{\phi_{def}}{\phi_{cr}} \frac{\phi_{hr}}{\phi_{cr}}] P_{def} \\ C &= [-3\ 692 + 6\ 743 \frac{\phi_{hr}}{\phi_{cr}} - 2\ 963(\frac{\phi_{hr}}{\phi_{cr}})^2] P_{hr} + [10\ 980 - 18\ 730 \frac{\phi_{hr}}{\phi_{cr}} + 8\ 108(\frac{\phi_{hr}}{\phi_{cr}})^2] P_{hm} \end{aligned} \right. \quad (15)$$

2.4 APF 显式计算公式误差分析

简化后的 APF 显式计算式的误差来源于变量 $CSTE_{fit}$ 和 $HSTE_{fit}$ 的近似拟合。

变量 $CSTE_{fit}$ 最大拟合误差由式 (16) 计算。在常用空调器参数范围内^[16], 计算出当 $EER_{cr2}/EER_{crm} = 0.6$ 时, $CSTE_{fit}$ 的误差最大, 最大误差为 0.45%。

$$\left\{ \begin{aligned} \max: \eta_{CSTE} &= \left| \frac{CSTE - CSTE_{fit}}{CSTE} \right| \\ s.t. & 0.6 \leq EER_{cr2}/EER_{crm} \leq 1 \end{aligned} \right. \quad (16)$$

$HSTE_{fit}$ 的最大拟合误差由式 (17) 计算。在常用空调器的参数范围内^[16], 计算可得, 在 $\phi_{def}/\phi_{cr2} = 1.18$, $\phi_{hr}/\phi_{cr2} = 1.31$, $P_{hr} = 1\ 323$ W, $P_{hm} = 461$ W, $P_{def} = 1\ 538$ W 时, 误差最大, 最大误差为 0.2%。

APF 显式计算式的误差由式 (18) 计算, 变量 $CSTE_{fit}$ 和 $HSTE_{fit}$ 是 APF_{fit} 分母的一部分, APF 近似计算误差 < $CSTE$ 和 $HSTE$ 拟合误差之和。因此简化后的 APF 显式公式的误差在 $\pm 0.65\%$ 以内。

$$\left\{ \begin{aligned} \max: \eta_{CSTE} &= \left| \frac{CSTE - CSTE_{fit}}{CSTE} \right| \\ s.t. & 1.0 \leq \phi_{def}/\phi_{cr2} \leq 1.4 \\ & 1.0 \leq \phi_{hr}/\phi_{cr2} \leq 1.4 \\ & 1\ 000 \leq P_{hr} \leq 1\ 500 \\ & 400 \leq P_{hm} \leq 600 \\ & 1\ 300 \leq P_{hr} \leq 1\ 600 \end{aligned} \right. \quad (17)$$

3) 利用数据点进行拟合, 确定公式中的拟合系数, 拟合结果如式 (14) 所示。

2.3.4 显式计算的 APF 简化公式

最后将 $CSTE_{fit}$ 和 $HSTE_{fit}$ 的计算式 (13) 和 (14) 代入式 (12), 得到 APF 显式计算的简化公式 (15)。

$$\eta_{APF} = \left| 1 - \frac{APF_{fit}}{APF} \right| < (\eta_{CSTE} + \eta_{HSTE}) = 0.65\% \quad (18)$$

3 APF 约束方程组的推导

3.1 约束方程的类别

APF 有两类约束方程, 分别为能力约束方程和能效约束方程; 能力约束方程来自国标性能约束, 能效约束方程来自几何尺寸约束。GB/T 7725—2004 规定了关于额定工况能力和半工况能力的约束关系。空调换热器的几何尺寸约束了空调器在 5 个测试工况下的能效。

为了满足国标的规定和空调器结构参数的要求, 需要将上述两类约束条件转化成约束方程, 作为 APF 目标函数优化求解的约束条件。

3.2 能力的约束方程推导

能力约束方程来自国标性能约束。GB/T 7725—2004 规定, 中间制冷能力是额定制冷能力的一半, 如式 (19) 所示; 中间制热能力是额定制热能力的一半, 如式 (20) 所示。

$$\phi_{cm} = 0.5\phi_{cr} \quad (19)$$

$$\phi_{hm} = 0.5\phi_{hr} \quad (20)$$

3.3 能效的约束方程推导

3.3.1 理论推导

空调器在 APF 5 个测试工况下运行时, 空调换热器的几何尺寸是不变的, 所以空调器在 5 个测试工

况下的能效值是受到约束的。

能效约束方程就是通过换热器的几何尺寸约束推导得到的。理论循环示意图如图 2 所示,能效值可表示为室内机进出口的制冷剂焓差与压缩机进出口制冷剂焓差的比值,如式(21)所示。式中 $(h_2-h_1)/(h_{2s}-h_2)$ 的值只与蒸发温度 T_e 、冷凝温度 T_c 有关,且与 T_e 和 T_c 的关系接近线性,运用数据拟合的方法可将变量 $(h_2-h_1)/(h_{2s}-h_2)$ 简化为 T_e 和 T_c 的线性函数,如图 3、图 4 所示。蒸发温度或冷凝温度可表示为室内机的 UA 与换热量的函数,如式(22)所示。其中 UA 主要由空气侧的热阻决定,可近似视为定值。 UA 的值可通过实验测得的蒸发温度或冷凝温度和对应的能力值计算,如式(23)所示。将式(22)、式(23)带入式(21),得到测试工况能效的约束方程,如式(24)所示。

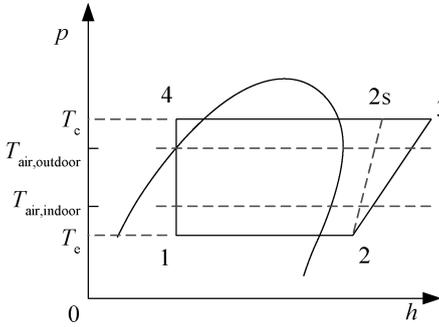


图 2 理论循环示意图

Fig.2 Diagram of the theoretical cycle

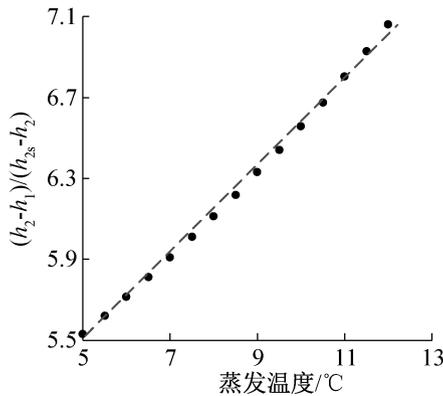


图 3 不同蒸发温度下变量 $(h_2-h_1)/(h_{2s}-h_2)$ 的值

Fig.3 Variation of $(h_2-h_1)/(h_{2s}-h_2)$ with evaporating temperature

$$EER = \frac{k(h_2 - h_1)}{h_{2s} - h_2} = k(a + bT_e + cT_c) \quad (21)$$

$$T_{indoor} = T_{air,indoor} - \phi/UA \quad (22)$$

$$UA = \frac{\phi_{exp,indoor}}{T_{air,indoor} - T_{exp,indoor}} \quad (23)$$

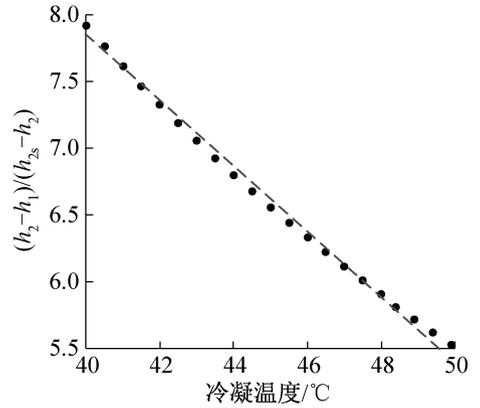


图 4 不同冷凝温度下变量 $(h_2-h_1)/(h_{2s}-h_2)$ 的值

Fig.4 Variation of $(h_2-h_1)/(h_{2s}-h_2)$ with condensing temperature

$$EER = k \left[a + b(T_{air,indoor} - \frac{\phi(T_{air,indoor} - T_{exp,indoor})}{\phi_{exp,indoor}}) + cT_c \right] \quad (24)$$

式中: k 为压缩机等熵压缩效率; EER 为理论循环的能效; h_1, h_2, h_{2s} 为循环各点的焓, kJ/kg ; T_e 为蒸发温度, $^{\circ}\text{C}$; T_c 为冷凝温度, $^{\circ}\text{C}$; a, b, c 为拟合系数; $T_{air,indoor}$ 为室内空气干球温度, $^{\circ}\text{C}$; T_{indoor} 为室内机的蒸发或冷凝温度, $^{\circ}\text{C}$; UA 为室内机的换热系数, kJ/K ; ϕ 为制冷量或制热量, W ; T_{exp} 为实验测得的蒸发或冷凝温度, $^{\circ}\text{C}$; ϕ_{exp} 为实验测得的能力值, W 。

采用上述方法,可以分别得到额定制冷、中间制冷、额定制热、中间制热和低温制热 5 个工况能效的约束方程,分别如式(25a)~式(25e)所示。

$$\begin{cases} EER_{cr} = k \left[a + b \left(27 - \frac{\phi_{cr}(27 - T_{cr,exp})}{\phi_{cr,exp}} \right) + cT_{cr} \right] & (a) \\ EER_{cm} = k \left[a + b \left(27 - \frac{\phi_{cm}(27 - T_{cm,exp})}{\phi_{cm,exp}} \right) + cT_{cm} \right] & (b) \\ COP_{hr} = k \left[a + bT_{hr} + c \left(\frac{\phi_{hr}(T_{hr,exp} - 20)}{\phi_{hr,exp}} - 20 \right) \right] & (c) \\ COP_{hm} = k \left[a + bT_{hm} + c \left(\frac{\phi_{hm}(T_{hm,exp} - 20)}{\phi_{hm,exp}} - 20 \right) \right] & (d) \\ COP_{def} = k \left[a + bT_{def} + c \left(\frac{\phi_{def}(T_{def,exp} - 20)}{\phi_{def,exp}} - 20 \right) \right] & (e) \end{cases} \quad (25)$$

3.3.2 误差分析

能效约束方程的误差由能效与蒸发温度和冷凝温度之间的近似拟合导致,由式(26)计算。对于制冷剂 R410A,拟合系数 $a = 13.1212, b = 0.1890, c = -0.1949$,常用空调器蒸发温度范围为 $5 \sim 12^{\circ}\text{C}$,冷凝温度范围为 $40 \sim 50^{\circ}\text{C}$ 。根据式(26)计算可得,在

蒸发温度为 12 ℃, 冷凝温度为 45 ℃ 时误差最大, 最大误差为 0.42%。

$$\begin{cases} \max: \eta = \left| \frac{EER - EER_{fit}}{EER} \right| \\ s.t.: 5 \leq T_e \leq 12 \\ 40 \leq T_c \leq 50 \end{cases} \quad (26)$$

4 多约束寻优求解 APF 最大值

APF 最大值采用多约束条件寻优进行求解。多约束条件寻优以 APF 显式公式为目标函数, 基于能力约束方程和能效约束方程, 运用遗传算法求解最优值。多约束条件寻优过程如下:

- 1) 将额定制冷、额定制热和低温制热能力组合作为个体初始化种群 G_0 。
- 2) 根据 APF 约束方程计算个体特征参数。
- 3) 利用 APF 目标函数计算每个个体的 APF, 若个体 APF 增大, 转至第 4 步; 否则选取 APF 最大的个体参数作为最终求解结果, 迭代终止。
- 4) 在 G_n 代种群中挑选出适应度高的个体组成下一代种群 G_{n+1} , G_{n+1} 代种群发生遗传变异产生子代 P_{n+1} , 转至步骤 2。
- 5) 重复步骤 2~4, 直到产生 APF 的最大值和各个测试工况性能值。

5 案例分析

本文选择了一款常用的变频空调器进行 APF 最大值求解。空调器的输入参数包括一组实验数据, 包括额定制冷、中间制冷、额定制热、中间制热和低温制热 5 个工况点的蒸发温度、冷凝温度、能力和能效值, 如表 1 所示。

表 1 常用房间空调器各工况点测试数据

Tab.1 Testing data of a commonly used room air conditioner

工况	蒸发温度/℃	冷凝温度/℃	能力/W	能效	APF
额定制冷	12.8	51.1	3 434	3.10	
中间制冷	16.8	40.6	1 755	4.43	
额定制热	0.2	40.9	4 407	3.16	3.375
中间制热	2.6	31.0	2 277	4.44	
低温制热	-4.6	33.9	3 585	2.50	

采用多约束寻优方法求解 APF 最大值, 目标函数是 APF 显式计算式, 如式 (15) 所示; 约束方程由式 (19)、式 (20) 和式 (25) 给出, 式中参数由表 1 中的数

据确定; 寻优算法是遗传算法, 可以直接使用 MATLAB optimtool 工具箱中提供的遗传算法。具体步骤如下:

目标函数: APF 显式计算公式, 式 (15);

约束条件:

$$\begin{cases} \phi_{hm} = \frac{1}{2}\phi_{hr}, \phi_{cm} = \frac{1}{2}\phi_{cr} \\ EER_{cr} = -0.00046(\phi_{cr} - 3407.2) + 3.463 \\ EER_{cm} = -0.0011(\phi_{cm} - 1767.1) + 4.875 \\ COP_{hr} = -0.00040(\phi_{hr} - 4755.7) + 3.139 \\ COP_{hm} = -0.00075(\phi_{hm} - 2271.2) + 5.161 \\ COP_{def} = -0.00052(\phi_{def} - 4106.3) + 2.691 \end{cases}$$

求解工具: MATLAB optimal 工具箱中遗传算法。

APF 最大值的求解结果如表 2 所示。通过计算结果可知, 该型号变频空调器需要适当降低额定制冷和中间制冷工况的能力以提高能效, 而额定制热、中间制热和低温制热工况需要提升能力, 能效可以适当降低。优化后该变频空调器的 APF 与原测试值相比提升了 6.37%。

表 2 房间空调器最大 APF 及各工况性能

Tab.2 Maximum APF and detailed capacities and powers of air conditioner

工况	额定制冷	中间制冷	额定制热	中间制热	低温制热
能力/W	3 342	1 671	4 557	2 279	4 409
能效	3.13	4.56	3.11	4.44	2.10
APF	3.590				

6 结论

1) 本文提出一种快速求解变频空调器最大 APF 的方法。该方法首先将国标中复杂的 APF 隐式定义转化为简单的 APF 显式计算式, 作为优化计算的目标函数; 根据国标规定和空调器结构参数的限制, 得到优化计算的约束方程; 通过优化计算得到变频空调 APF 的最大值和对应 5 个工况能力能效组合。

2) 根据 GB/T 7725—2004 中 APF 的隐式定义式, 推导了 APF 的显式公式并进行了简化, 得到了形式简单的 APF 显式公式, 其计算误差在常用空调器性能数值范围内 < 0.65%。

3) 根据本文提供的最大 APF 求解方法, 对一款常用变频空调器的运行工况进行了优化, 得到的 APF 比原有值提升了 6.37%。

参考文献

[1] 王泮浩, 费继友, 金立文, 等. 变频空调器控制系统的技术现状和发展趋势[J]. 制冷学报, 2000(2):1-6. (WANG Fenghao, FEI Jiyou, JIN Liwen, et al. Developing tendency and current situation of controlling technology in frequency conversion air conditioner[J]. Journal of Refrigeration, 2000(2):1-6.)

[2] 房间空气调节器:GB 7725—2004[S]. 北京:中国标准出版社, 2004. (Room air conditioner: GB 7725—2004[S]. Beijing: Standards Press of China, 2004.)

[3] 转速可控型房间空调器能效限定值及能效等级:GB 21455—2013[S]. 北京:中国标准出版社, 2013. (Minimum allowable value of the energy efficiency and energy efficiency grades for variable speed room air conditioner: GB 21455—2013[S]. Beijing: Standards Press of China, 2013.)

[4] 苏亮. APF——家用空调器节能评价新方法[J]. 家电科技, 2011(6):17. (SU Liang. APF—the new evaluation methods for household air conditioner[J]. China Appliance Technology, 2011(6):17.)

[5] 颜承初, 赵伟, 石文星. 单元式空调机 APF 性能评价中的两个关键问题[J]. 电器, 2008(5):68-70. (YAN Chengchu, ZHAO Wei, SHI Wenxing. Two key problems in the evaluation of APF for the unitary air conditioner[J]. China Appliance, 2008(5):68-70.)

[6] 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.)

[7] 王硕渊. 中国 APF 标准中低温制热的影响[J]. 装备制造, 2013(4):60-62. (WANG Shuoyuan. The influence of low temperature heating on APF standard in China[J]. Mechanical Equipment, 2013(4):60-62.)

[8] 范道, 刘警生. 浅谈家用空调新国标 APF 机型的开发[J]. 科技创业家, 2013, 4(1):204. (FAN Xiao, LIU Jingsheng. Discussion in the development of the APF air condition for the new version National Standards[J]. Technological Pioneers, 2013, 4(1):204.)

[9] 黄剑云. 热泵型变频空调器 APF 提升方法探讨[J]. 制冷与空调(北京), 2014, 14(3):46-48. (HUANG Jianyun. Discussion of the method for APF promotion in heat pump frequency conversion air conditioning[J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2014, 14(3):46-48.)

[10] 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, SUMIO SHIOCHI, et al. Evaporation temperature control module development and experimental validation of variable refrigerant flow air conditioning system in

EnergyPlus[J]. Journal of Refrigeration, 2011, 32(5):25-30.)

[11] 孟岩勇, 南晓红. 完整工作日中变频房间空调器动态特性仿真[J]. 制冷学报, 2007, 28(5):20-25. (MENG Yanyong, NAN Xiaohong. Dynamic simulation on characteristics of an inverter room air conditioner in a complete working day[J]. Journal of Refrigeration, 2007, 28(5):20-25.)

[12] 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. 宁波:中国家用电器协会, 电器杂志社, 2014. (QIN Cuntao, QI Yingxia, HU Xiangjiang, et al. Experimental studies on promotion of household air conditioning APF efficiency[C]//The 2014 China Household Appliance Technology Conference. Ningbo: China Household Appliance Association, Electrical Magazine, 2014.)

[13] 刘圣春, 马一太, 成建宏. 变频型房间空调器区域性季节能效比的研究[J]. 制冷学报, 2005, 26(2):47-50. (LIU Shengchun, MA Yitai, CHENG Jianhong. Study on regional SEER of frequency conversion room air conditioner[J]. Journal of Refrigeration, 2005, 26(2):47-50.)

[14] 祁伟, 何林, 田云, 等. 使用焓差法测试空调 APF 不确定度计算方法的研究[J]. 家电科技, 2014(1):107. (QI Wei, HE Lin, TIAN Yun, et al. The disquisition of uncertainty using enthalpy potential test air-condition's APF[J]. China Appliance Technology, 2014(1):107.)

[15] 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.)

[16] 珠海格力电器股份有限公司. 格力变频空调器规格参数[EB/OL]. (2018-07-07)[2018-08-07]. <https://www.gree.com>. (Gree Electric Appliances, Inc. of Zhuhai. Parameters of constant speed air conditioner of Gree[EB/OL]. (2018-07-07)[2018-08-07]. <https://www.gree.com>)

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,制冷与低温工程研究所,(021) 34206378, E-mail: glding@sju.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, Institute of Refrigeration and Cryogenics, School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, +86 21-34206378, E-mail: glding@sju.edu.cn. Research fields: simulation and optimization for refrigeration appliances and utilization of new refrigerants.