

DOI:10.19431/j.cnki.1673-0062.2020.05.011

自然工质 CO₂ 在风冷热泵复合冷凝系统中 换热特性的时间序列分析

陈飞虎^{1,2}, 柴 宁², 龚光彩¹

(1. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410008; 2. 长沙麦融高科股份有限公司, 湖南 长沙 410006)

摘要:为研究自然工质 CO₂ 在风冷热泵复合冷凝系统中的热力学特性, 引入有限时间热力学与焓分析方法, 采用 MATLAB/SIMULINK 进行仿真, 建立了自然工质 CO₂ 在风冷热泵复合冷凝系统的时间序列模型, 模拟和测试了自然工质 CO₂ 在风冷热泵复合冷凝系统中的热力学特性, 并与自然工质 CO₂ 单制冷系统及原风冷热泵复合冷凝系统的性能做了对比。结果表明: 制热水模式下, 两个风冷热泵复合冷凝系统的焓效率都随用户要求的卫生热水水温升高而降低; 达到用户需要水温 53 ℃ 时, 自然工质 CO₂ 风冷热泵复合冷凝系统卫生热水机组运行约需 18 min, 而 R22 风冷热泵复合冷凝系统约为 30 min。复合冷凝模式下自然工质 CO₂ 风冷热泵系统的 COP (coefficient of performance) 为 4.7 左右, 比 R22 风冷热泵系统略高。

关键词:有限时间热力学; 焓分析; 自然工质 CO₂; 风冷热泵; 复合冷凝过程; 卫生热水
中图分类号: TB61 **文献标志码:** A

文章编号: 1673-0062(2020)05-0071-06

Time Series Analysis of Compound Condensation Process (CCP) in Air-cooled Heat Pump System with Natural Refrigerant CO₂

CHEN Feihu^{1,2}, CHAI Ning², GONG Guangcai¹

(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha, Hunan 410008, China; 2. Changsha Maxxom High-Tech Co., Ltd., Changsha, Hunan 410006, China)

Abstract: In order to avoid the aggravation of greenhouse effect, the application of natural refrigerants in refrigeration system is a trend. In order to study the thermodynamic characteristics of natural refrigerants in air-cooled heat pump compound condensing system, the finite time thermodynamic analysis and exergy analysis methods are employed to establish the air cooled heat pump CCP simulation model, with the natural refrigerant CO₂. And the

收稿日期: 2020-04-10

基金项目: 湖南省博士后基金资助项目(198415)

作者简介: 陈飞虎(1982-), 男, 工程师, 博士, 湖南大学土木学院在站博士后。主要从事热力系统优化调度、高热密度建筑节能技术等方面的研究。E-mail: maxxom121@163.com

simulation tool is MATLAB/SIMULINK software. The thermodynamic characteristic of the two CCP systems are studied; the subject is a air-cooled heat pump unit. The result shows that on the sanitary hot water mode, the exergy efficiency declines according to the sanitary hot water temperature that the user demand; to reach the temperature of the sanitary hot water tank 53 °C, the CO₂ compound condensation system of air cooled heat pump need about 18 min, while the R22 compound condensation system of air cooled heat pump is about 30 min. The COP of the CO₂ air cooled heat pump system is about 4.7 at the compound condensation mode, and it is higher than the R22 air cooled heat pump system.

key words: finite time thermodynamic; exergy method; natural refrigerant CO₂; air-cooled heat pump; compound condensation process (CCP); sanitary hot water

0 引言

目前,复合冷凝技术已成为国家标准而被广泛应用。同时,为避免温室效应的加剧等,自然工质在制冷系统中的应用是一种趋势。而对自然工质 CO₂ 的应用多集中于传统单冷系统^[1-2]。在复合冷凝过程的研究方面:苏欢等以一台风冷热泵冷凝热回收机组为研究对象,根据机组结构参数建立了基于热平衡与压力平衡的准静态反演方程,并测量了一个周期的冷凝热回收运行过程的外部参数,利用反演模型反推了整个冷凝热回收过程的内部参数变化过程、状态分布以及换热部件的工作状态,同时测量了机组的压缩机进出口制冷剂温度与实时功率、蒸发器进出口制冷剂温度等,用于验证反演结果的正确性,通过反演分析寻找该风冷热泵冷凝热回收机组在设计中的不合理因素,提出了优化改造方案^[3]。在有限时间热力学及时间序列分析方法方面,王洪金等对制冷系统的融霜过程建立了时间序列的分析方法,研究了结霜工况下蒸发温度变化对空气源热泵性能的影响。依据有限时间热力学内可逆原理,简化了结霜工况下的空气源热泵循环过程,并分析了实际热工过程的最大能效输出。利用 CYCLEPAD 软件,对结霜工况下的空气源热泵结霜性能进行数值模拟,得到结霜工况下制热量,机组的制热性能系数,压缩机排气温度等性能参数随时间变化的规律^[4]。王立平等应用时间序列的方法和内可逆卡诺循环的概念和理论,并且在 CYCLEPAD 这个热力学仿真软件中建立了内可逆的冷凝热回收模型。提出了复合冷凝模式的冷凝热回收技术在 CYCLEPAD 中根据有限时间的分析方法进行仿真模拟的方法和具体步骤,并对风冷热泵复合冷凝过程的性能建立了评价模型,得到复合冷凝模式制冷循环冷凝热回收率与压缩

机出口温度之间的关系曲线^[5]。龚光彩课题组引入有限时间热力学方法和焓分析方法和 SIMULINK 软件建立了大型离心式制冷机组的复合冷凝模型^[6-8],以及氟系替代制冷剂 R407C 和 R410A 在复合冷凝系统的仿真模型,其对象为风冷热泵复合冷凝过程,并与原 R22 系统的性能做了对比^[9]。但是对复合冷凝过程应用自然工质 CO₂ 的研究较少。随着全球温室气体排放标准的发展,自然工质的复合冷凝系统亟待开发。本文将应用有限时间热力学分析方法,对 CO₂ 跨临界循环风冷热泵复合冷凝过程进行仿真计算,并提出系统性能计算及能效评价的时间序列方法。

1 自然工质 CO₂ 风冷热泵复合冷凝过程的物理模型

自然工质 CO₂ 风冷热泵复合冷凝过程与 R22 和氟系替代制冷剂复合冷凝过程结构相同,都是在压缩机的出口增加一卫生热水生产装置,由压缩机、卫生热水生产装置、气体冷却器膨胀阀和蒸发器等部件组成(如图 1 所示)。低压气态制冷剂经压缩机被压缩成高压气态制冷剂(1-2),经卫生热水生产装置和气体冷却器定压放热(2-3-4),再经节流阀节流(4-5)后,低压液态制冷剂在蒸发器内定压吸热(5-1),最后回到压缩机,从而完成一个循环^[10]。

2 自然工质 CO₂ 跨风冷热泵复合冷凝过程的数学模型

有限时间热力学模型是一个连续模型,能够反应系统的实际运行状况,而在实际的系统测试时,为了设计实验的方案等需要,将系统的换热过程简化为一系列的换热周期。并用一系列的方程组来描述该系统的特点,是不同时间上的各个

数值按时间先后顺序排列而形成的序列,简称时间序列方法^[11]。

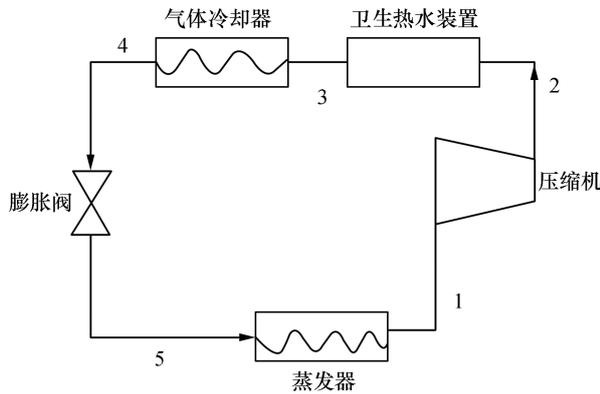


图1 自然工质 CO₂ 风冷热泵复合冷凝过程的系统原理图

Fig.1 The system schematic diagram of CO₂ cycle of air-cooled heat pump compound condensation process

2.1 卫生热水装置的数学模型

自然工质 CO₂ 风冷热泵复合冷凝过程中 CO₂ 循环过程的 t - s 图如图 2 所示^[12]。

其数学模型建立过程已公开发表^[13-14]。

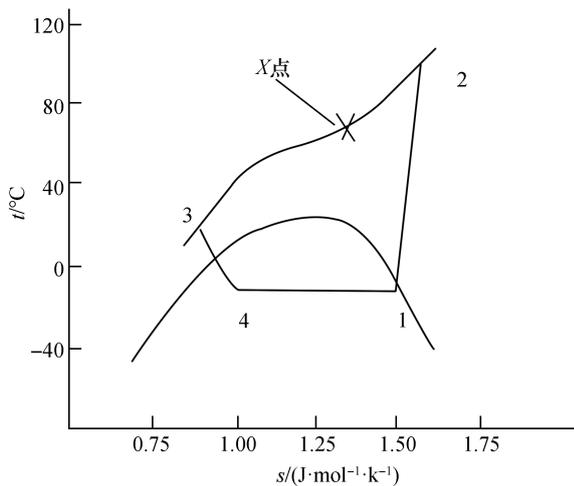


图2 自然工质 CO₂ 风冷热泵复合冷凝过程中循环的 t - s 图

Fig.2 The t - s diagram of cycle in CO₂ cycle of air-cooled heat pump

2.2 气体冷却器的数学模型

针对图 2 中 CO₂ 从饱和气体状态点到饱和液体状态点,气液比从 1 到 0 之间,利用 Dobson 关联式,对 CO₂ 近临界区冷凝过程中的局部换热系数和压降的变化情况进行热力计算^[15]。

$$h = 0.023 Re_1^{0.8} Pr_1^{0.4} \left(1 + \frac{2.22}{x_{tt}^{0.89}} \right) \frac{\lambda}{d} \quad (1)$$

$$Re_1 = \frac{G(1-x)d}{\mu_1} \quad (2)$$

$$Pr_1 = \frac{C_{pl}\mu_1}{\lambda} \quad (3)$$

$$x_{tt} = \left(\frac{1-x}{x} \right)^{0.9} \left(\frac{\rho_v}{\rho_l} \right)^{0.5} \left(\frac{\mu_l}{\rho_v} \right)^{0.1} \quad (4)$$

$$\frac{dP}{dL} = \frac{32G}{Re_p d} \quad (5)$$

式中: λ 为 CO₂ 的导热系数(W/(m·K)); Re_1 为 CO₂ 液体的雷诺数; Pr_1 为 CO₂ 液体的普朗特数; x_{tt} 为湍流参数; C_{pl} 为 CO₂ 的比热容(kJ/(kg·K)); μ_1 为 CO₂ 的动力黏度(kL/(m·s)); ρ_l 为液态 CO₂ 的密度(kg/m³); d_p/d_l 为 CO₂ 沿水平管单位长度上的压降(bar/m); Re 为 CO₂ 的雷诺数; ρ_g 为气态 CO₂ 的密度(kg/m³)。

气体冷却器的焓损失:

$$I_{condi} = m_{ref} \cdot i_{condi} \quad (6)$$

又有:

$$i_{condi} = (h_{xi} - h_3) - T_0(s_{xi} - s_3) \quad (7)$$

X 点的选择必须避免湿压缩。

输入参数:1) 压缩机的效率取为 75%; 2) 蒸发温度的范围取为 -5 °C 至 5 °C。

3 自然工质 CO₂ 风冷热泵复合冷凝过程的 Simulink 仿真模型

3.1 卫生热水装置的仿真模型

1) 制冷剂侧的焓损失:将环境温度 20 °C 作为参考温度,设定卫生热水初始温度 t_0 为 20 °C,根据系统的冷凝温度(t_c)和蒸发温度(t_e),冷凝器确定出口点 2 的熵值 s_2 ,从而计算得出卫生热水出口温度 X_i 点的熵值 s_{X_i} 。然后将 s_2 减去 s_{X_i} ,结果($s_2 - s_{X_i}$)乘以卫生热水初始温度 T_0 和制冷剂质量 m_{ref} ,得到制冷剂侧的焓损失 $m_{ref} T_0 (s_2 - s_{X_i})$ 。如图 3 所示^[16]。

2) 水侧的焓损失:根据制冷剂的比热容 C_{ref} 和卫生热水的初始温度 T_0 ,以及水的比热容 C_w ,根据卫生热水吸收的热量与制冷剂在热回收装置的放热量相等,可以求出卫生热水的质量流量 M_{shw} 。对第 i 次循环,将 s_i 减去 s_{i-1} ,计算结果($s_i - s_{i-1}$)乘以 T_0 和 m_{hrw} ,得到水侧的焓损失 $M_{shw} T_0 (s_i - s_{i-1})$,如图 4 所示。

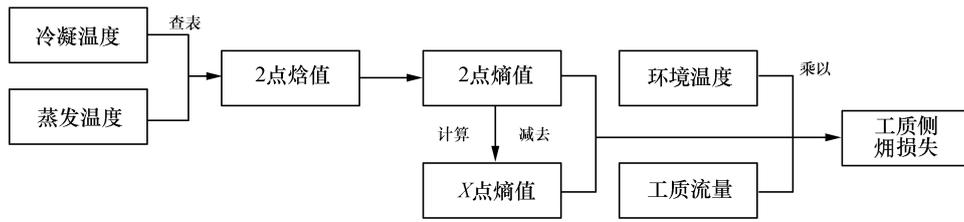


图3 制冷剂侧焓损失的仿真模型

Fig. 3 The simulation model of coolant side exergy loss

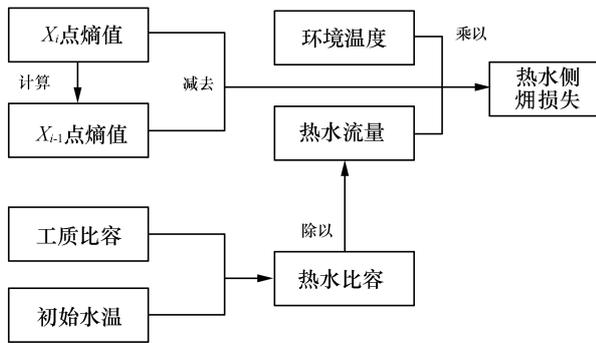


图4 卫生热水侧焓损失的仿真模型

Fig. 4 The simulation model of exergy loss on sanitary hot water side

然后将卫生热水侧加上制冷剂侧的焓损失模块 $m_{ref}T_0(s_2-s_{X_i})$, 则可以得到卫生热水供应装置的焓损失, 参见公式(3)。

3.2 气体冷却器的仿真模型

根据气体冷却器的数学模型, 得到 CO_2 的跨临界 SCV(trans-critical cycle) 循环复合冷凝过程气体冷却器的仿真模型, 系统输入参数: 水的比热 C_p 为 $4.2 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ 、质量流量 M_{shw} 为 $2.5 \text{ kg}/\text{min}$ 、环境温度 T_0 为 $20 \text{ }^\circ\text{C}$, 如图5所示。

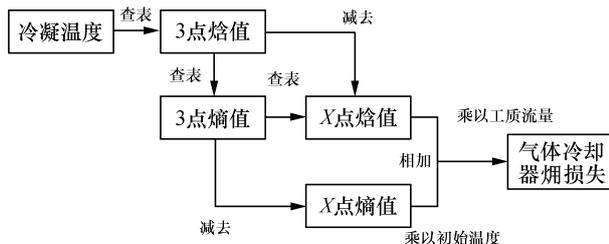


图5 气体冷却器的仿真模型

Fig. 5 The simulation model of gas cooler

4 计算结果与讨论

将已有的实验数据对仿真模型进行验证。对

制冷模式, 系统 COP (coefficient of performance, 指能量与热量之间的转换比率, 简称能效比。)与排气压力的关系, 由仿真模型计算出的值与实测数据^[17]对比见图6。

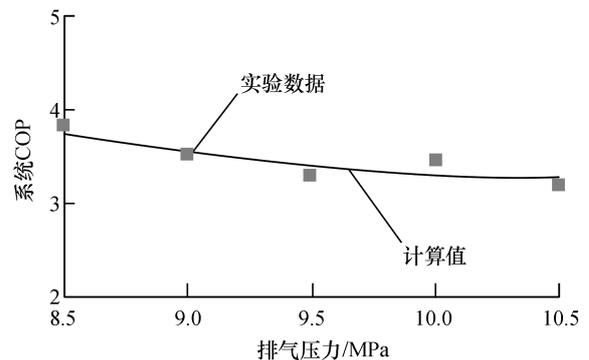


图6 单级 CO_2 制冷循环仿真模型计算值与实验数据比较

Fig. 6 The comparison of calculated values of single stage CO_2 cycle simulation models with experimental data

图6显示了单级 CO_2 跨临界循环的排气压力有 8.5 MPa 变化到 10.5 MPa 时, 系统的 COP 值由 3.8 左右降低到 3.2 左右。

为了验证复合冷凝仿真模型的准确性, 比较分析了 CO_2 单冷模式仿真模型的计算值与实验值的相对误差, 按下式计算^[18]:

$$\sigma = \frac{|\text{计算值} - \text{实验值}|}{\text{实验值}} \times 100\% \quad (8)$$

表1比较了5个不同压力条件下系统的 COP 值的相对误差。

从表1可以看出, 当压缩机排气温度为 10 MPa 时, 模型的误差最大, 为 8.9% 。因此该模型满足工程精度要求。

将该仿真模型应用于供热与卫生热水模式的计算, 表2给出了自然工质 CO_2 复合冷凝过程的运行参数。

表1 单级 CO₂ 跨临界循环仿真模型值与实验数据的相对误差

Table 1 The relative error between single model CO₂ cycle simulation model and experimental data

| 测试条件 | 排气压力/MPa | 相对误差/% |
|------|----------|--------|
| 1 | 8.5 | 6.7 |
| 2 | 9.0 | 2.3 |
| 3 | 9.5 | 4.3 |
| 4 | 10.0 | 8.9 |
| 5 | 10.5 | 3.8 |

表2 自然工质 CO₂ 循环风冷热泵复合冷凝过程的运行参数

Table 2 The operation parameters of CO₂ cycle air-cooled heat pump compound condensation process

| 运行模式 | 冷凝温度/℃ | 蒸发温度/℃ | 低压压力/MPa | 高压压力/MPa | 排气温度/℃ |
|---------------|--------|--------|----------|----------|--------|
| 制冷 | 39 | 5 | 3 | 9 | 95 |
| 供卫生热水— 供热风 | 53 | 0 | 4.5 | 12 | 130 |

根据仿真模型计算出的排气温度及压力值等,可以在 $t-s$ 图上绘出该流程图,见图2。

由图7 供热水—供热风模式下 CO₂ 系统水箱出口水温与运行时间关系图,可以看出卫生热水机组运行约 18 min 已达到用户需要水温,所以该机组的运行计算周期为 18 min。而系统约需 30 min^[19]。表明自然工质 CO₂ 系统在供热工况下有优势。

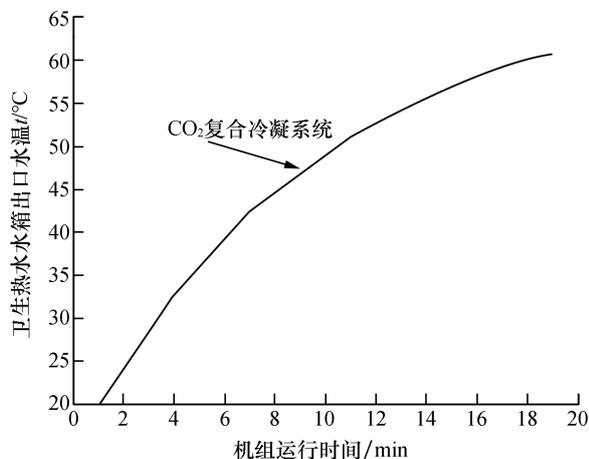


图7 供热水-供热风模式下 CO₂ 系统水箱出口水温与运行时间关系图

Fig.7 The relationship between water temperature and running time of CO₂ system outlet under hot water and hot air supply mode

供卫生热水—供热风模式下,CO₂ 系统开始时 COP 比较高,约为 4.7,而 CO₂ 单冷系统的 COP 约为 3.5,如图8。CO₂ 系统卫生热水—供热风模式要高于 CO₂ 制冷模式的 COP,随运行时间的推移,系统效率逐渐下降,这是因为随卫生热水水温的升高,复合冷凝系统回收的热量逐渐减少。其 COP 值逐渐降低至 3.5 左右。而 R22 系统则由 4.1 左右降到 3.2 左右。该趋势与原复合冷凝系统一致。如图8所示。

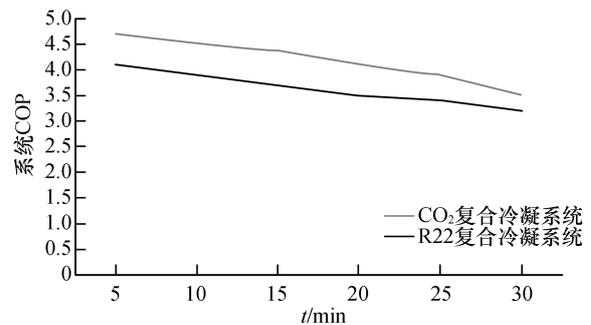


图8 供卫生热水-供热风模式下 CO₂ 系统与系统的能效对比

Fig.8 The comparison of energy efficiency between CO₂ system and system under sanitary hot water and hot air supply mode

5 结论

在自然工质 CO₂ 风冷热泵复合冷凝系统的换热过程中,卫生热水生产装置的换热量是逐时变化的。传统经典热力学分析方法无法反映一个换热周期内的具体过程,导致计算结果粗糙。本文应用时间序列分析方法,再现了卫生热水由初始温度上升到用户所需温度的换热过程。由于 CO₂ 在复合冷凝系统中实现还受条件限制,本文用已发表的文献数据对制冷模式下 CO₂ 系统的仿真模型进行验证,然后采用仿真的方法对其在复合冷凝中的运行特性进行估测。结果表明该方法可行。相比制冷模式,自然工质 CO₂ 系统在供热模式下具有优势,适用于复合冷凝系统。

参考文献:

- [1] ADRIANSYAH W. Combined air conditioning and tap water heating plant using CO₂ as refrigerant[J]. Energy and building,2004,36(4):690-695.
- [2] 李敏霞,马一太,李丽新,等. CO₂ 循环在较低温制冷系统中的应用分析[J]. 流体机械,2003,31(11):59-63.

- [3] 苏欢. 空调冷凝热回收过程的热力学优化与反演方法研究[D]. 长沙:湖南大学,2017:46-53.
- [4] 龚光彩,王洪金,吕东彦,等. 基于有限时间热力学结霜工况热泵性能分析[J]. 湖南大学学报,2009,36(12):4-8.
- [5] 王立平. 复合冷凝过程热力学仿真[D]. 长沙:湖南大学,2008:17-23.
- [6] GONG G C, CHEN F H, SY H, et al. Thermodynamic simulation of condensation heat recovery characteristics of a single stage centrifugal chiller in a hotel[J]. Applied energy,2012,91(1):326-333.
- [7] 陈飞虎. 复合冷凝过程热力学仿真与优化研究[D]. 长沙:湖南大学,2014.
- [8] 陈飞虎,龚光彩,孙小琴. 离心式制冷机组复合冷凝过程热力学仿真[C]//中国建筑学会建筑热动力分会第二十届学术交流大会文集. 合肥:《暖通空调》杂志社,2017.
- [9] WANG L P, GONG G C, CHEN F H, et al. Finite-time thermodynamic simulation of circulating direct condensation heat recovery on chillers[C]//The 7th International Green Energy Conference. 2012, Dalian, China:24-29.
- [10] 陈剑波,闵矿伟. R410A 水源热泵空调机组变进水温度运行特性分析[J]. Fluid machinery, 2011, 39(3):52-57.
- [11] WANG H T, ZHOU S B, WEI ZH S. A study of secondary heat recovery efficiency of a heat pipe heat exchanger air conditioning system[J]. Energy and buildings,2016,133(1):206-216.
- [12] SINTEF P N. Energy research refrigeration and air conditioning[M]. Norway:Wiley,2002:190-192.
- [13] GONG G C, ZENG W. A new heat recovery technique for air-conditioning/heat-pump system [J]. Applied thermal engineering,2008,28(17/18):2360-2370.
- [14] BEN A M. A green affordable housing coalition fact sheet [M]. Green affordable housing coalition:Wiley Online Library,2005:319-324
- [15] LEE A H W, JONES J W. Analytical model of a residential desuperheater[J]. Applied energy,1997,57(4):271-285.
- [16] CHEN F H, LIAO S G, GONG G C. Thermodynamic simulation of CCP in air-cooled heat pump unit with HFCs and CO₂ trans-critical[J]. Journal of power and energy engineering,2018,6(9):141-164.
- [17] BEITELMAL A H, FABRIS D. Servers and data centers energy performance metrics[J]. Energy and buildings, 2014,80(10):562-569.
- [18] MARIJIA S T, JEONG T K. Data centre's energy efficiency optimization and greening:Case study methodology and R&D needs[J]. Energy and buildings,2014,85(9):564-578.
- [19] YOON S H, PAYNE W V. Residential heat pump heating performance with single faults imposed[J]. Applied thermal engineering,2011,31(5):765-771.

(上接第70页)

- [6] LI S, KANG X, HU J. Image fusion with guided filtering [J]. IEEE transactions on image processing, 2013, 22(7):2864-2875.
- [7] ZHOU Z, LI S, WANG B. Multi-scale weighted gradient-based fusion for multi-focus images [J]. Information fusion, 2014, 20(1):60-72.
- [8] BAVIRISETTI D P, DHULI R. Two-scale image fusion of visible and infrared images using saliency detection[J]. Infrared physics & technology, 2016, 76:52-64.
- [9] SUN J, ZHU H, XU Z. Poisson image fusion based on Markov random field fusion model [J]. Information fusion, 2013, 14(3):241-254.
- [10] LIU Y, LIU S. A general framework for image fusion based on multi-scale transform and sparse representation [J]. Information fusion, 2015, 24:147-164.
- [11] GANGNET M, BLAKE A. Poisson image editing [J]. ACM siggraph, 2003, 22(3):313-318.
- [12] HOCKNEY W. A fast direct solution of Poisson's equation using Fourier analysis [J]. Journal of the ACM, 1965, 12(1):95-113.
- [13] ZHU P, HUANG Z. A fusion method for infrared-visible image and infrared-polarization image based on multi-scale center-surround top-hat transform[J]. Optical review, 2017, 24(3):370-382.
- [14] LI H, MANJUNATH B S, MITRA S K. Multisensor image fusion using the wavelet transform [J]. Graphical models and image processing, 1995, 57(3):235-245.
- [15] LEWIS J J, ROBERT J O, NIKOLOV S G. Pixel-and region-based image fusion with complex wavelets [J]. Information fusion, 2007, 8(2):119-130.
- [16] NENCINI F, GARZELLI A, BARONTI S. Remote sensing image fusion using the curvelet transform [J]. Information fusion, 2007, 8(2):143-156.
- [17] CUNBA D, ARTHUR L, ZHOU J. The nonsubsampling contourlet transform: Theory design and applications [J]. IEEE transactions on image processing, 2006, 15(10):3089-3101.
- [18] LIU Y, LIU S, WANG Z. A general framework for image fusion based on multi-scale transform and sparse representation [J]. Information fusion, 2015, 24:147-164.