

复合冷凝过程综合能效的评价模型及算例

吕清泉¹, 陈飞虎²

¹克萊門特捷聯制冷設備(上海)有限公司, 湖南 長沙

²湖南大學土木工程學院, 湖南 長沙

收稿日期: 2023年1月28日; 录用日期: 2023年2月27日; 发布日期: 2023年3月7日

摘要

目前, 复合冷凝过程已经上升成为国家标准, 而传统的经典热力学评价方法粗糙。为了精确地对系统进行能效评价和便于指导操作测试, 引入国际上比较前沿的有限时间热力学分析方法。本文建立了卫生热水装置水温上升的连续数学模型, 并在此基础上提出了离散的累积求和模型。并针对改造后的2600 W的风冷热泵, 以全热回收模式为例, 介绍了冷凝热回收率与综合能效系数的评价模型和测定方法。然后, 通过实验结果与风冷热泵复合冷凝装置仿真结果进行了验证。结果表明: 该评价方法简便, 精度高。可以为该类热力系统的评价及测试提供参考。

关键词

复合冷凝, 能效评价, 风冷热泵, 测定方法

Evaluation Model and Example of Comprehensive Energy Efficiency of Compound Condensation Process

Qingquan Lv¹, Feihu Chen²

¹Climate Jetlink Refrigeration Equipment (Shanghai) Company, Changsha Hunan

²School of Civil Engineering, Hunan University, Changsha Hunan

Received: Jan. 28th, 2023; accepted: Feb. 27th, 2023; published: Mar. 7th, 2023

Abstract

At present, the compound condensation process has become a national standard, but the traditional classical thermodynamic evaluation methods are rough. In order to accurately evaluate the energy efficiency of the system and guide the operation test, the international advanced finite time thermodynamic analysis method is introduced. In this paper, a continuous mathematical model of

文章引用: 吕清泉, 陈飞虎. 复合冷凝过程综合能效的评价模型及算例[J]. 仪器与设备, 2023, 11(1): 32-39.

DOI: 10.12677/iae.2023.111005

water temperature rise in sanitary hot water plants is established and a discrete cumulative summation model is proposed. Taking the total heat recovery model as an example, the evaluation model and assay method of the recovery rate of condensing heat and comprehensive energy efficiency coefficient are introduced for the modified 2600 W air-cooled heat pump. Then, the experimental results are verified with the simulation results of air-cooled heat pump compound condensing device. The results show that the method is simple and accurate. It can provide a reference for the evaluation and test of this kind of thermal system.

Keywords

Compound Condensation, Energy Efficiency Evaluation, Air-Cooled Heat Pump, Assay Method

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

复合冷凝空调系统是指在常规冷凝器前增加了热回收装置,将冷凝部分分为两段:高温段的通过增加的热回收装置进行回收,生产生活热水;低温段的通过常规冷凝器进行冷凝。相比常规的制冷系统,复合冷凝空调系统可回收冷凝器排放的废热,增加了系统的制冷能力,降低了压缩机的排气压力。目前,复合冷凝过程已经上升成为国家标准,但是传统经典热力学对系统的评价方法粗糙,因为其方法为稳态的评价方法,不能反映换热过程随时间变化的换热过程。为了对系统进行能效评价和便于操作,学者引入能反映实际换热过程的有限时间热力学对系统进行建模。陈等对有限时间热力学实际热力系统中的应用现状进行了总结,提出该方法是衡量热力系统精度较高的方法[1][2]。陈等应用有限时间热力学方法对单元式水冷多联热管系统的参数进行了优化,得到最优水流量和制冷剂充注量,同时提出了系统能效评价方法,并对全国五个气候区的热管节能率进行了计算和分析,结果表明:其节能率达20%~45%,其精度满足工程精度要求[3][4]。陈等以实际算例介绍了空调系统能效的有限时间热力学评价方法,指出了针对全年气候参数变化的情况,按一年为一周期计算评价空调系统的综合能效较为合理,而这种评价方法也逐渐成为本专业广泛的认可[5][6]。陈针对自然工质CO₂在风冷热泵复合冷凝系统中换热特性,在有限时间热力学连续积分模型的基础上,提出了基于时间序列分析的简化方法。结果表明:该方法便于操作,精度可靠[7][8]。本文针对目前缺乏较可靠的复合冷凝过程卫生热水水温上升的模型[9][10],提出卫生热水装置的连续数学模型和时间序列分析的离散测试方法,对复合冷凝过程冷凝热回收率与综合能效系数进行计算,并以实际测试案例介绍该测试方法。

2. 风冷热泵装置复合冷凝过程的物理模型

目前,风冷热泵热水系统应用广泛,但对风冷热泵热水的复合冷凝过程进行系统仿真的研究较少。风冷热泵复合冷凝过程分为部分热回收和全热回收的模式,属于热回收装置和常规冷凝器双冷凝器联合工作。为了解决其对系统性能的影响,双冷凝器在风冷热泵系统中的仿真模型需要开发。本文针对热泵装置复合冷凝的制冷循环,将应用火用分析方法进行分析。同时,通过实验对比来验证仿真模型及方法的合理性和可靠性,从而对热泵装置复合冷凝过程的优化进行指导。最后,根据热泵装置的代数累积模型,结合实例,给出计算热泵装置效率和热回收率等的测试方法。如图1所示。

制冷剂在空调冷热源设备中工作的 $T-S$ 图如图2所示。

在图2中,1-2-3-4-5-1表示制冷剂的理想可逆循环,而1'-c-3'-4'-5'-1'表示了制冷剂的实际循环的 $T-S$

图。1-2 代表压缩机的理想等熵压缩过程, 但压缩机的实际压缩过程是不可逆的, 如过程线 1-c 所示。在理想条件下, 冷凝器出口制冷剂应为压缩机排气压力下的饱和液态 4, 而实际循环中, 制冷剂流经冷凝器因不可避免的压力损失, 冷凝器出口制冷剂的状态应为 4', 然后进入膨胀阀, 接着节流到状态点 5', 进入蒸发器, 但由阻力损失的存在, 蒸发器出口的状态点为 1', 而 X 点则为部分热回收模式下热回收装置与常规冷凝器的分界点。

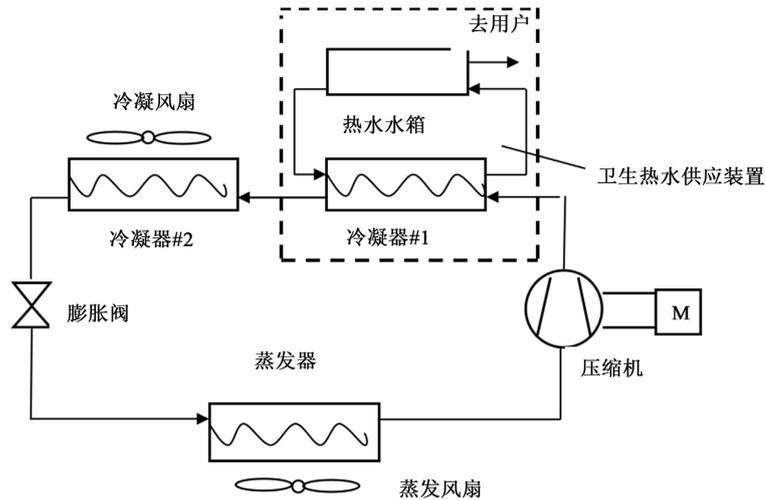


Figure 1. Condensation mode of air-cooled condenser using water-cooled + air-cooled composite condensation mode

图 1. 采用水冷 + 风冷复合冷凝模式的风冷冷凝器的冷凝模式

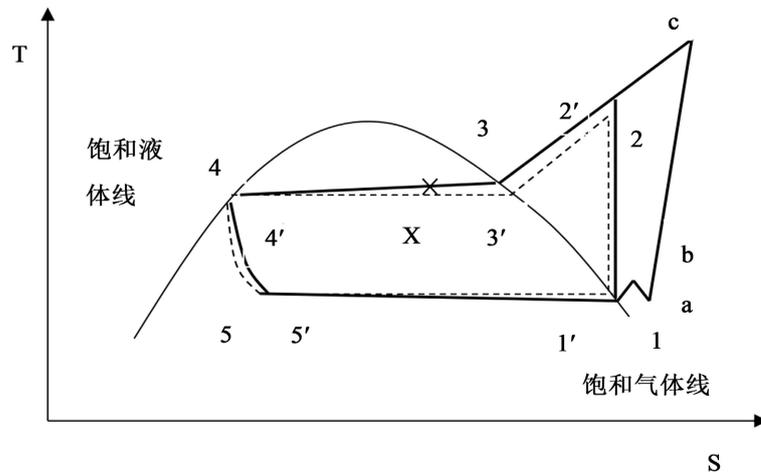


Figure 2. T-S diagram of the refrigerant cycle in the compound condensation process of the air-cooled heat pump

图 2. 风冷热泵复合冷凝过程中制冷剂循环的 T-S 图

测试方法是以卫生热水工况全热回收模式为例, 工况为过渡季, 建筑不需要开启空调, 但是又有卫生热水需求。装置的测试条件在室外温度 $t_w = 20.0^\circ\text{C}$, 室外相对湿度 $\Phi_w = 70.9\%$ 时进行。

3. 直流式冷凝热回收系统的测定方法

对循环式冷凝热回收系统, 其卫生热水水温温升过程属于典型的有限时间热力学过程, 根据卫生热

水生产装置的离散数学模型公式, 可以按下列公式确定卫生热水每次循环的时间(τ_0):

$$\tau_0 = \frac{\rho_{hrw} \times V_{hrw}}{m_{hrw}} \quad (1)$$

式中: τ_0 为卫生热水每次(i)循环的时间, 单位为秒(s); m_{hrw} 为经过热回收装置的卫生热水的流量, 单位为千克每秒(kg/s); V_{hrw} 为热水箱容积, 单位为立方米(m^3); ρ_{hrw} 为热水的密度, 单位为千克每立方米(kg/m^3)。

根据公式(1)计算出循环时间 τ_0 。如果 $\tau_0 > 3$ 分钟(min), 则取测量周期 $\tau_0 = 3$ 分钟(min); 如果 $\tau_0 \leq 3$ 分钟(min), 则取测量周期 $\tau = \tau_0$ 。以 τ 为周期, 测量出每次循环周期卫生热水的温升, 当卫生热水温升小于 ΔT (一般取 $\Delta T < 2^\circ C$) 或者达到预设的温度时停止测量[11]。

4. 测试结果与分析

对于直流式冷凝热回收的系统, 维持热回收装置的入口水温不变, 连续测量卫生热水的出口水温, 当测量的出口水温温升小于 ΔT (一般取 $\Delta T < 2^\circ C$) 或者达到预设的温度时停止测量。此时的出口水温即可认为是该直流式冷凝热回收系统能提供的热水温度[11]。

单次测量热回收量:

1) 对于循环式冷凝热回收系统, 单次测量周期内的热回收量 q_{hrwi} 可由下列公式计算得出, 当热水循环周期 τ_0 等于单次测量周期 τ 时(即 $\tau_0 \leq 3$ 的情况), 此时 q_{hrwi} 即为热水每循环一次的热回收量。

$$q_{hrwi} = c_{pw} V_{HRW} \rho_{hrw} (T_i - T_{i-1}) (i = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

式中: q_{hrwi} 为单次测量热回收量 q_{hrwi} , 单位为千焦(kj); i 代表第 i 次测量; n 为总测量次数; T_i 为第 i 次测量的水箱内的热水温度, 单位为摄氏度($^\circ C$); C_{pw} 为热水的定压比热, 单位为千焦每摄氏度每千克 [$kJ/(kg \cdot ^\circ C)$]。

2) 对于直流式冷凝热回收系统, 单位时间热回收量, 可以由下列公式计算得出:

$$q_{hrw} = c_{pw} m_{hrw} (T_1 - T_0) \quad (3)$$

式中: T_1 为热回收装置出口水温, 单位为摄氏度($^\circ C$); T_0 为热回收装置进口水温, 单位为摄氏度($^\circ C$)。

热回收率:

$$\begin{aligned} R_x &= \frac{Q_x}{Q_{cr}} \times 100\% \\ &= \frac{\sum_{i=1}^n q_{hrwi}}{m_{ref} \cdot \sum_{i=1}^n (h_{ci} - h_{4'i})} \times 100\% \\ &= \frac{c_{pw} \times V_{hrw} \times \rho_{hrw} \times (T_n - T_0)}{\sum_{i=1}^n (w_{compi} + q_{0ri}) \tau} \times 100\% \\ &= \frac{c_{pw} \times V_{hrw} \times \rho_{hrw} \times (T_n - T_0)}{W_{comp} + Q_{0r}} \times 100\% \end{aligned} \quad (4)$$

式中: Q_x 为机组的总热回收量, 单位为千瓦(kw); Q_{cr} 为机组的总冷凝热释放量, 单位为千瓦(kw); m_{ref} 为制冷剂的流量, 单位为千克每秒(kg/s); h_{ci} 为 c 点的焓值, 单位为千焦每千克(kj/kg); $h_{4'i}$ 为 $4'$ 点的焓值, 单位为千焦每千克(kj/kg); w_{compi} 、 w_{comp} 为每次循环测得的压缩机功率和压缩机总功, 单位为千瓦(kw); q_{0ri} 、 Q_{0r} 为每次循环测得的制冷率和总制冷量, 单位为千瓦(kw)。

名义工况下的热回收率:

$$Q_x = \frac{Q'_r}{Q'_{cr}} \times 100\% = \frac{c_{pw} \times V_{hrw} \times \rho_{hrw} \times (T'_i - T'_{i-1})}{(w'_{compi} + q'_{ori}) \tau'} \times 100\% \quad (5)$$

式中: Q'_r 为名义工况下机组的热回收量, 单位为千瓦(kw); Q'_{cr} 为名义工况下的机组冷凝热释放量, 单位为千瓦(kw); $T'_i - T'_{i-1}$ 为名义工况下的热水温升, 单位为摄氏度(°C); w'_{compi} 为名义工况下的压缩机的功率, 单位为千瓦(kw); q'_{ori} 为名义工况下的制冷率, 单位为千瓦(kw); τ' 为名义工况下的时间周期, 单位为秒(s)。

系统综合能效系数:

$$COP_t = \frac{Q_{0r} + Q_r}{W_{0r}} = \frac{\tau \sum_{i=1}^n q_{0ri} + \sum_{i=1}^n q_{hrwi}}{\tau \sum_{i=1}^n w_i} = \frac{\tau \sum_{i=1}^n q_{0ri} + c_{pw} \times V_{hrw} \times \rho_{hrw} \times (T_n - T_0)}{\tau \sum_{i=1}^n w_i} \quad (6)$$

式中: w_i 为每次循环测得的机组功率, 单位为千瓦(kw); W_{0r} 为总的机组输入功率值, 单位为千瓦(kw)。

名义工况下的系统综合能效系数:

$$COP'_t = \frac{Q'_{0r} + Q'_r}{W'_{0r}} = \frac{\tau' q'_{0ri} + c_{pw} \times V_{hrw} \times \rho_{hrw} \times (T'_i - T'_{i-1})}{\tau' w'_i} \quad (7)$$

式中: Q'_{0r} 为名义工况下的制冷量, 单位为千瓦(kW); Q'_r 为名义工况下的热回收量, 单位为千瓦(kW); w'_i 为名义工况下的机组功率, 单位为千瓦(kW)。

改造后的风冷热泵全热回收模式, 热泵的参数为: 额定制冷量/热泵制热量: 7120 W/7700 W; 制冷剂名称/注入量为: R22/2.51 kg; 额定输入功率: 制冷热泵 2600 W/2420 W; 系统能效 EER/COP: 2.74/3.18; 运行工况: 制冷工况下运行, 室外风机关闭, 热回收系统水泵开启, 水箱出水量为 12 升每分钟(L/min); 水箱中水的初始温度: 23°C; 水箱容积: 80 L, 当卫生热水温达到预设的 55°C 时, 停止测量。计算得出卫生热水每次循环的时间 $\tau = 6.67$ 分钟(min), 取 $\tau = 3$ 分钟(min), 即每 3 分钟记录一次相关参数。

其测试数据如表 1、表 2 所示, 在经过 24 分钟的运行后达到了预设的水温。

$$\text{名义工况热回收率: } \frac{Q_{hw}}{Q_{cond}} = \frac{C_{hw} \cdot M_{hw} \cdot \Delta T}{Q_{ref} + W} = \frac{4.2 \cdot 80 \cdot (40 - 23)}{(7419 + 2618) \cdot 11.7 \cdot 60} = 81.1\%$$

$$\text{能效: } \frac{Q_{hw} + Q_w}{W} = \frac{C_{hw} \cdot M_{hw} \cdot \Delta T + Q_w}{W} = \frac{4.2 \cdot 80 \cdot (40 - 23) + 7419 \cdot 11.7 \cdot 60}{2618 \cdot 11.7 \cdot 60} = 6.2$$

Table 1. Test data of nominal operating point**表 1.** 名义工况点测试数据

水箱中水温(°C)	运行时间(min)	空调出口风温(°C)	空调入口风温(°C)	制冷量(W)	机组输入功率(W)
40	11.7	9.4	29.7	7419	2618
45	15.2	8.8	29.3	7489	2750

Table 2. Test data of air-cooled heat pump full heat recovery mode**表 2.** 风冷热泵全热回收模式测试数据

水箱中水温(°C)	运行时间(min)	空调出口风温(°C)	空调入口风温(°C)	制冷量(W)	机组输入功率(W)
27.5	3	14.2	31.2	6229	2332
31.9	6	12.8	30.8	6579	2398
36.2	9	10.8	30.3	7142	2530
40.5	12	9.4	29.7	7419	2618
44.6	15	8.8	29.3	7489	2750
48.4	18	8.1	28.7	7559	2794
52.1	21	7.4	28.4	7699	2904
55.8	24	6.8	27.8	7699	2970

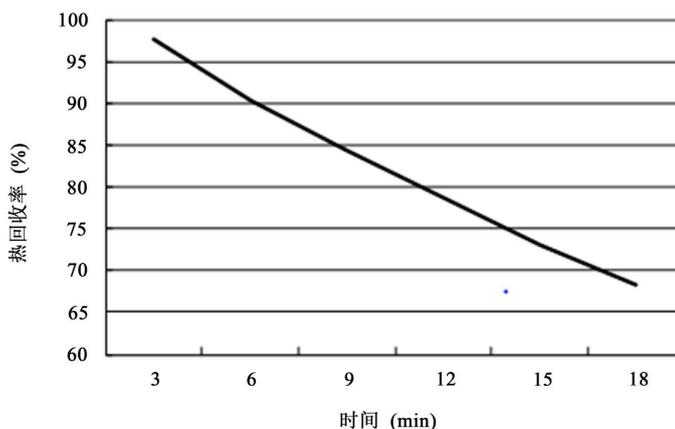
系统热回收率:

$$R_x = \frac{c_{pw} \times V_{hrw} \times \rho_{hrw} \times (T_n - T_0)}{\sum_{i=1}^n (w_{compi} + q_{0ri}) \tau} \quad (8)$$

名义工况热回收率:

$$R_x = \frac{c_{pw} \times V_{hrw} \times \rho_{hrw} \times (T'_i - T'_{i-1})}{(w'_{compi} + q'_{0ri}) \tau'} \times 100\% \quad (9)$$

热回收率计算结果如图 3 所示。可以看到, 热回收率从接近 100% 逐渐降低, 在一个周期, 约 24 分钟时, 降低到 67% 左右, 可以得到该全热回收模式的热回收率约为 78%。

**Figure 3.** The relationship between heat recovery rate and time**图 3.** 热回收率与时间的关系曲线

系统综合能效系数:

$$COP_t = \frac{\tau \sum q_{0ri} + c_{pw} + V_{hrw} \times \rho_{hrw} \times (T_n - T_0)}{\tau \sum_{i=1}^n w_i} \quad (10)$$

名义工况下的综合能效系数:

$$COP_t = \frac{\tau' q'_{0ri} + c_{pw} \times V_{hrw} \times \rho_{hrw} \times (T'_i - T'_{i-1})}{\tau' w'_i} \quad (11)$$

综合能效系数计算结果如下图4所示。系统的综合能效由开机时的7.2左右逐渐降低至4.3左右,平均能效约为5.7,相比传统空调系统约提高17%。

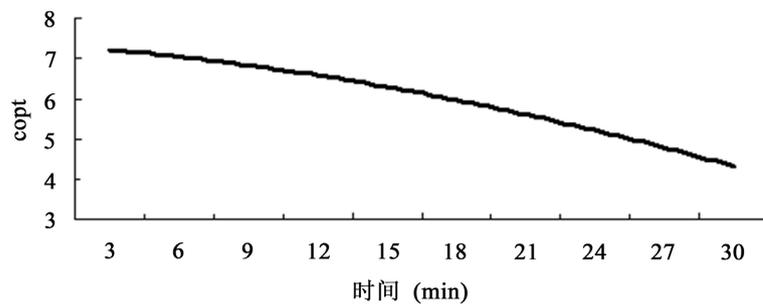


Figure 4. The relationship between system COP_t and time
图4. 系统 COP_t 与时间的关系曲线

误差分析

系统热回收的计算值与测试值约为4%,能效比的计算值与测试值约为 $(6.2 - 5.7)/6.2 = 8.1\%$,符合工程精度要求。

5. 结论

对典型容量大小的风冷热泵复合冷凝装置建立了机组各工况模式下的仿真模型,并对复合冷凝/蒸发多功能热泵机组在不同运行工况下的性能参数进行了实验测试,实验结果表明:与风冷热泵复合冷凝装置仿真结果的规律基本一致,证明该仿真模型是可靠的。根据风冷热泵复合冷凝装置中卫生热水水温上升的代数累积模型,提出了计算复合冷凝系统性能的累计求和的计算算法,并结合实例提出风冷热泵机组效率的简易测试方法。其结论如下:

1) 提出当热水循环周期 τ_0 等于单次测量周期 τ 时(即 $\tau_0 \leq 3$ 的情况),则取测试周期为 τ ,否则,取测试周期为3 min。以改造后的2.6 KW的风冷热泵全热回收模式为例,计算得出卫生热水每次循环的时间周期 $\tau = 6.67$ 分钟(min),取该案例的 $\tau = 3$ 分钟(min),即每隔3分钟记录一次相关参数。

2) 该风冷热泵复合冷凝过程全热回收模式的热回收率约为82%。

3) 风冷热泵复合冷凝过程的平均能效约为5.7,相比传统空调系统约提高17%。

这一仿真和测试方法精度符合工程精度要求,对复合冷凝热泵装置的测试及优化有指导意义。

参考文献

- [1] 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]: [博士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2017.
- [2] 陈飞虎, 廖曙光, 王程. 空调系统能效的有限时间热力学评价方法及算例[J]. 建筑热能通风空调, 2021, 40(6):

57-59+56.

- [3] 陈飞虎, 柴宁, 龚光彩. 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[J]. 南华大学学报(自然科学版), 2020, 34(5): 71-76.
- [4] 王文华, 陈林根, 戈延林, 孙丰瑞. 燃气轮机循环有限时间热力学研究新进展[J]. 热力透平, 2012, 41(3): 171-178+208.
- [5] 陈林根, 孙丰瑞, 陈文振. 热电制冷和泵热循环的有限时间热力学分析[J]. 工程热物理学报, 1994(1): 13-16.
- [6] 黄峻伟, 王辉涛, 王华, 高宏宇, 刘军云, 葛众. 蒸汽压缩式热泵的有限时间热力学分析及优化[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2012, 37(3): 45-49.
- [7] 陈飞虎. 复合冷凝过程热力学仿真与优化研究[D]: [博士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2014.
- [8] 陈飞虎, 廖曙光. 某电信机房节能改造全年能效的热力学分析[J]. 建筑热能通风空调, 2021, 40(10): 55-58.
- [9] 王立平. 复合冷凝过程热力学仿真[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2008.
- [10] 折晓会. 溶液除湿蒸发过冷复合制冷系统理论与实验研究[D]: [博士学位论文]. 南京: 东南大学, 2016.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 空调冷凝热回收设备[M]. 北京: 中国标准出版社, 2013.