

文章编号: 1671-6612 (2024) 03-305-08

太阳能吸收压缩制冷 与真空膜除湿耦合系统性能优化

袁伦睿 淳良 刘东 廖子成

(西南科技大学土木工程与建筑学院 绵阳 621010)

【摘要】 对于太阳能吸收式制冷系统, 很难产生较低温的冷冻水用于除湿和冷却, 并且面临间歇性的问题。提出了一种新型的温湿度独立控制系统 (SACV), 该系统集成了太阳能吸收式制冷 (SSAR) 子系统、蒸汽压缩制冷 (VCR) 子系统和真空膜除湿 (VMD) 子系统。VMD 子系统和 VCR 子系统分别解决了除湿困难和全天候制冷问题。建立并验证了热力学数学模型, 分析了集热器面积和热水流量对集热器出口热水温度的影响, 以及对集热器、SSAR 子系统和 SACV 系统性能的影响, 并对 SSAR 子系统和 SACV 系统进行了性能优化。结果表明, 集热器出口热水温度的增加, 使得 SSAR 子系统存在最佳性能; 通过变化热水流量来改变集热器出口热水温度, 使得 SACV 系统存在最佳性能。集热器面积增加 73.7%, SSAR 子系统的性能达到最佳, 提升了 0.24%, 制冷量增长 69.64%, 同时 SACV 系统性能提升 4.71%, 耗功量减少 36.18%, 但系统成本增加, 因此, 需要综合考虑系统性能和经济效益。

【关键词】 太阳能; 吸收式制冷; 膜除湿; 集热器出口热水温度; 优化
中图分类号 TK51 文献标志码 A

Performance Optimization of a System Integrating Solar Absorption Compression Refrigeration and Vacuum Membrane-based Dehumidification

Yuan Lunrui Chun Liang Liu Dong Liao Zicheng

(School of Civil Engineering and Architecture, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, 621010)

【Abstract】 For solar absorption cooling systems, it is difficult to generate lower chilled water for dehumidifying and cooling, as well as facing intermittency problems. In this work, the novel SACV system for indoor temperature and humidity control is proposed, which integrates the SSAR subsystem, the VCR subsystem, and the VMD subsystem. The VMD subsystem and the VCR subsystem solve the dehumidification difficulty and all-weather cooling problems, respectively. A thermodynamic model of the SACV system is established and validated. The effect of collector area and hot water flowrate on the collector outlet hot water temperature is analyzed, as is the effect on the performance of the collector, the SSAR subsystem, and the SACV system. In addition, the performance of the SSAR subsystem and the SACV system has been optimized. The results showed that the increase in the collector outlet hot water temperature resulted in the optimal performance of the SSAR subsystem. The SACV system operates at optimum performance by varying the collector outlet hot water temperature by varying the hot water flowrate. The collector area increased by 73.7%, the SSAR subsystem reached optimum performance with a 0.24% improvement and a 69.64% increase in cooling capacity, while the SACV system performance increased by 4.71% and power consumption decreased by

作者简介: 袁伦睿 (1999-), 男, 在读硕士研究生, E-mail: yuanlr@mailswust.edu.cn

通讯作者: 刘东 (1984-), 男, 博士, 教授, E-mail: dtld123@126.com

收稿日期: 2023-12-03

36.18%. However, the cost of the system has increased, so it is necessary to consider the performance of system and economic benefits.

【Keywords】 Solar absorption refrigeration; Membrane dehumidification; Collector outlet hot water temperature; Optimizatio

0 引言

太阳能是一种很有吸引力的清洁能源，太阳能可用于通过热驱动的冷却过程产生冷却效果。使用溴化锂-水 (LiBr-H₂O) 作为溶液工质对的吸收式制冷被广泛用于太阳能制冷系统^[1]。太阳能单效吸收式制冷 (SSAR) 系统是最常见的太阳能制冷系统，当 SSAR 系统产生低温冷冻水时，虽然解决了除湿困难的问题，但却导致了较低的系统性能指数 (COP)，降低了太阳能的利用率，并增加了 SSAR 系统的初始成本^[2,3]。因此，为了有效解决蒸发温度升高导致的除湿困难的问题，将太阳能吸收式制冷技术与除湿技术相结合。研究者对此进行了相关研究^[4-6]。然而，目前的温湿度独立控制空调系统主要采用固体或液体干燥剂来控制湿度。真空膜除湿技术是一种新型除湿技术^[7,8]，利用真空泵在水蒸气选择性透过膜两侧形成的化学势差来干燥空气。目前将真空膜除湿技术应用于太阳能空调系统中的研究较少。

此外，太阳能吸收式制冷系统还存在不稳定和间歇性问题。Yu 等^[9]对太阳能吸收-过冷压缩混合冷却系统进行了实验研究，发现在不同天气条件下，吸收子系统的日平均太阳能 COP 和压缩子系统的日平均 COP 均有所增加。Chen 等^[10]提出了一种由绝热吸收和蒸汽压缩制冷系统组成的风冷太阳能辅助混合系统，与独立运行的蒸汽压缩子系统相比，该系统在级联模式下的制冷电效率提高了 63.9%~166.7%，在过冷模式下提高了 15.9%~29.8%。

为了解决 SSAR 系统难以除湿和全天候制冷需求的问题，从室内温湿度独立控制的角度出发，本工作提供了一种耦合了太阳能吸收压缩制冷和真空膜除湿的新型空调系统 (SACV)。在这个新系统中，由 SSAR 子系统和 VCR 子系统产生的高温冷冻水的冷却能力被用来处理空调房间的显性负荷。为了解决因蒸发温度升高而难以除湿的问题，VMD 子系统将单独处理空调房间的潜热负荷。特别是 VCR 子系统不仅满足了全天候的制冷和加热需求，还解决了间歇性的问题。本文建立了

SACV 系统的热力学模型，对计算分析了集热器面积和热水流量对集热器出口热水温度的影响，以及对集热器、SSAR 子系统和 SACV 系统性能的影响，并对 SSAR 子系统和 SACV 系统进行了性能优化。

1 循环流程

太阳能吸收压缩制冷与真空膜除湿耦合系统如图 1 所示，该系统由太阳能溴化锂单效吸收式制冷子系统、高温冷冻水循环子系统、蒸汽压缩式制冷子系统和真空膜除湿子系统耦合而成。R134a 是蒸汽压缩式制冷子系统的制冷剂。该系统在夏季工作时：当太阳能辐射强度足够驱动吸收式制冷运行时，由太阳能吸收式制冷子系统和蒸汽压缩式制冷子系统产生高温冷冻水，通过高温冷冻水循环子系统进入室内末端设备承担建筑全部空调显热负荷；当太阳能辐射强度不足以驱动吸收式制冷运行时，蒸汽压缩式制冷子系统独立承担建筑全部空调显热负荷，真空膜除湿子系统在新系统中承担全部的建筑空调潜热负荷。新系统基于温湿度独立控制技术，利用低品位能源，提高室内热湿环境的控制精度，降低空调能耗减少碳排放。

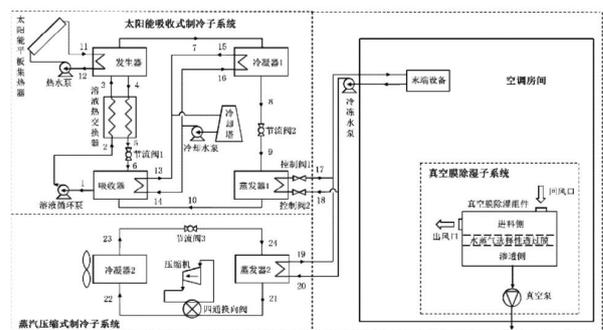


图 1 太阳能吸收压缩制冷与真空膜除湿耦合系统 (SACV) 原理图

Fig.1 Schematic of the SACV system

2 热力学模型

通过热力学模型分析来评估所提出的 SACV 系统的性能，SACV 热力学模型包括太阳能集热器模型、单效溴化锂-水吸收制冷系统模型、蒸汽压

缩制冷系统模型和真空膜除湿系统模型。

2.1 SACV 热力学模型

在热力学理论和传热传质理论的基础上,建立了 SACV 系统的热力学模型。为了简化热力学模型,本文对模型采用如下合理假设。

(1) 系统处于稳态状态。

(2) 冷凝器和蒸发器出口处的制冷剂分别处于饱和液体状态和饱和蒸汽状态。

(3) 热交换器中的流动被视为逆流。

(4) 忽略节流损失,即等焓过程。

(5) 发生器和吸收器出口的溶液在汽液相平衡中饱和。

(6) 对环境的热损失可以忽略不计,管道和热交换器中的压降和流动阻力也忽略不计。

(7) 压缩过程是等熵的。

首先,建立太阳能平板集热器模型:

集热器集热效率 η_{FPC} 为^[3]:

$$\eta_{FPC} = 0.79 - 3.94 \cdot [0.5 \cdot (T_{11} + T_{12}) - T_e] / I \quad (1)$$

式中, T_{11} , T_{12} 分别为集热器热水进出水温度, $^{\circ}\text{C}$; T_e 为环境温度, $^{\circ}\text{C}$; I 为太阳辐射强度, W/m^2 。

集热器集热量 Q_{FPC} 为:

$$Q_{FPC} = A \cdot I \cdot \eta_{FPC} \quad (2)$$

式中, A 为集热器面积, m^2 。

集热器中能量平衡方程为:

$$Q_{FPC} = C_p \cdot m_{hw} \cdot (T_{11} - T_{12}) \quad (3)$$

式中, C_p 为水的定压比热容, $\text{kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}$; m_{hw} 为集热器回水流量, kg/s 。

在单效溴化锂-水吸收制冷系统模型中溶液热交换器的效能 ε_{SHE} 为:

$$\varepsilon_{SHE} = \frac{T_4 - T_5}{T_4 - T_2} \quad (4)$$

式中, T 为各状态点温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

除太阳能集热器和真空膜除湿外,根据质量守恒定律,各部件质量平衡方程和溶液平衡方程分别如下:

$$\sum m_i - \sum m_o = 0 \quad (5)$$

$$\sum m_i X_i - \sum m_o X_o = 0 \quad (6)$$

式中, m_i 为工质入口质量流量, kg/s ; m_o 为工质出口质量流量, kg/s ; X_i 为溶液入口质量分数, %;

X_o 为溶液出口质量分数, %。

根据能量守恒定律,各部件能量平衡方程:

$$\sum Q_i + \sum w_i + \sum m_i h_i - \sum m_o h_o = 0 \quad (7)$$

式中, Q_i 为部件吸收的热量, kW ; w_i 为部件耗功, kW ; h_i 为工质入口的比焓, kJ/kg ; h_o 为工质出口的比焓, kJ/kg 。

真空膜除湿装置的除湿量 n_w 为:

$$n_w = \frac{r_l q_{total}}{\theta M_w} \quad (8)$$

式中, r_l 为潜热占比, %; q_{total} 为总制冷量, W ; θ 为汽化潜热, J/kg ; M_w 为水分子相对分子质量, kg/mol 。

膜的选择性系数 $S_{w/a}$ 为^[4]:

$$S_{w/a} = \frac{n_w}{n_a} \quad (9)$$

式中, n_w 为水蒸气物质的量, mol ; n_a 为空气物质的量, mol 。

真空泵耗功量 w_{VMD} 为:

$$w_{VMD} = \frac{1}{\eta_v} \frac{r_l q_{total} R T}{\theta M_w} \left\{ \frac{k_w}{k_w - 1} \left[\left(\frac{P_{amb}}{P_{vac}} \right)^{\frac{k_w - 1}{k_w}} - 1 \right] + \frac{1}{S_{w/a} k_a - 1} \left[\left(\frac{P_{amb}}{P_{vac}} \right)^{\frac{k_a - 1}{k_a}} - 1 \right] \right\} \quad (10)$$

式中, η_v 为真空泵效率; k_w 为水蒸气绝热指数; R 为理想气体常数, $8.314 \text{ J}/\text{mol} \cdot \text{K}$; T_{vac} 为渗透测温度, $^{\circ}\text{C}$; T 为温度, K ; P_{amb} 为环境压力, Pa ; P_{vac} 为渗透测压力, Pa 。

由于新型 SACV 系统中 SSAR 子系统利用低品位热能驱动, VCR 子系统和 VMD 子系统利用高品位电能驱动。因此,定义 SSAR 子系统的热性能指数 (TCOP) 和 SACV 系统机械性能指数 (MCOP)。TCOP 为 SSAR 子系统制冷量与集热量之比,如式 (11) 所示; MCOP 为 VCR 子系统和 VMD 子系统的制冷量和功耗之比,如式 (12) 所示。

$$TCOP = \frac{Q_{Eval}}{Q_{FPC}} = \frac{(X_4 - X_3)(h_{10} - h_9)}{X_4(h_4 - h_3) + (X_4 - X_3)(h_7 - h_4)} \quad (11)$$

$$MCOP = \frac{q_{total} - Q_{Eval}}{W_{Com2} + W_{VMD}} \quad (12)$$

式中, Q_{Eval} 为 SSAR 子系统制冷量, W 。

2.2 模型验证

本文利用工程方程求解器 (Engineering

Equation Solver) 对 SACV 系统的热力学模型方程进行求解。由于 SACV 系统是一个新型空调系统, 很难对其进行完整的验证。真空膜除湿模型采用了一般热力学方法, 其可靠性得到了很好的验证。因此, 本文对 SSAR 子系统和 VCR 子系统进行了严格的验证。

表 1 本 SSAR 子系统模型与文献^[11]的比较

Table 1 Comparisons of the present SSAR subsystem model with Ref^[11]

参数	本文模型	参考模型 ^[11]	误差 (%)
Q_{Eva1} (kW)	57.41	57.41	—
Q_{Con1} (kW)	61.06	61.06	—
T_{Eva1} (°C)	10	10	—
T_{Con1} (°C)	40	40	—
T_{Gen} (°C)	90	90	—
ε_{SHE}	0.6	0.6	—
Q_{Abs} (kW)	73.26	72.76	0.69%
Q_{Gen} (kW)	76.91	76.45	0.6%
$TCOP$	0.7465	0.75	-0.47%

表 1 给出了本模型的 SSAR 子系统结果与文献模型的比较。验证输入参数: $T_{Eva1}=10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{Con1}=40\text{ }^{\circ}\text{C}$, $Q_{Abs}=40\text{ kW}$, $T_{Gen}=90\text{ }^{\circ}\text{C}$, $Q_{Eva1}=57.41\text{ kW}$, $\varepsilon_{SHE}=0.6$ 。通过表 1 可以发现, 本文模型的最大误差为 0.69%, 说明该模型具有较高的精度。表 2 为本模型的 VCR 子系统结果与文献的比较。验证输入参数为: $Q_{Eva2}=50\text{ kW}$, $T_{Eva2}=-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{Con2}=40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。通过表 2 可以发现, 本文模型的最大误差为 0.07%, 说明该模型具有较高的精度。上述验证工作表明, 本文所建立的模型具有一定的可靠性。

表 2 本压缩子系统模型与文献^[11]的比较

Table 2 Comparisons of the present compression subsystem model with Ref^[11]

参数	本文模型	参考模型 ^[11]	误差 (%)
Q_{Eva2} (kW)	50	50	—
T_{Eva2} (°C)	-10	-10	—
T_{Con2} (°C)	40	40	—
Q_{Con2} (kW)	65.51	65.52	-0.02%
w_{Com} (kW)	17.23	17.24	-0.06%
COP	2.902	2.9	0.07%

2.3 建模参数

在本系统中发生温度由集热器出入口热水温度决定, 发生温度比集热器出入口热水平均温度低

$3\text{ }^{\circ}\text{C}$, 集热器入口热水温度设为 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。需要给定的条件为系统热力学模型的基本参数如表 3 所示。除非另有说明, 否则模型中的参数值为表 3 中的值。从经济角度考虑, 一般要求冷却水出塔温度比室外湿球温度高 $3\sim 5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 本文取 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。此外, 根据工程数据, 水冷式冷凝器传热温差取经验值为 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, 风冷式冷凝器传热温差取 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

表 3 SACV 系统建模参数

Table 3 Modeling parameters of the SACV system

参数	数值
大气压强 (kPa)	101.325
相对湿度 (%)	55
太阳辐射强度 (W/m^2)	800
环境温度 ($^{\circ}\text{C}$)	32
总冷负荷 (kW)	120
潜热占比	1/3
集热器面积 (m^2)	100
集热器流量 (kg/s)	1.2
集热器入口热水温度 ($^{\circ}\text{C}$)	70
蒸发温度 ($^{\circ}\text{C}$)	16
渗透侧压力 (kPa)	20
选择性系数	50

3 结果与讨论

为了分析集热器出口热水温度对集热器、SSAR 子系统和 SACV 系统性能影响, 本文将讨论改变集热器面积 (模式 I) 和改变热水流量 (模式 II) 两种情况, 并对 SSAR 子系统和 SACV 系统性能进行优化。

3.1 集热器出口热水温度对系统性能影响

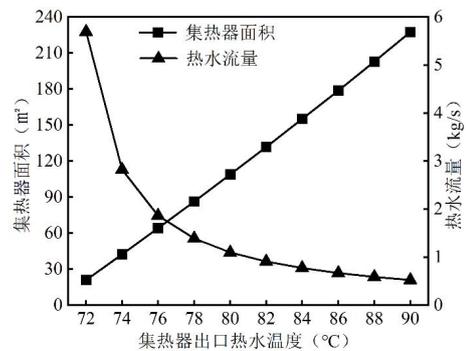


图 2 集热器出口热水温度和集热器面积、热水流量的关系
Fig.2 Relationship between the collector outlet hot water temperature and collector area and hot water flowrate

图 2 显示了集热器出口热水温度与集热器面积的关系。如图 2 所示, 当其它条件不变时, 若想集热器出口热水温度越大, 就需要集热器面积增加。集热器面积的增加, 集热器所收集的集热量就越多, 在集热器入口热水温度和热水流量不变时, 集热器出口热水温度升高。图 2 还显示了集热器出口热水温度与热水流量的关系。当其他条件不变时, 若想集热器出口热水温度越大, 就需要热水流量的减少。由公式 (3) 可知, 在集热量不变的时, 热水流量的减少, 单位热水流量获得的集热量增加, 集热器出口热水温度升高。

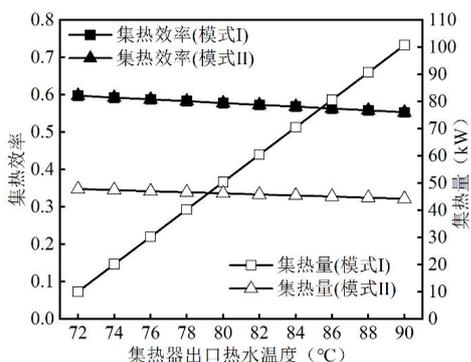


图 3 集热器出口热水温度对集热器集热效率和集热量的影响

Fig.3 Effect of collector outlet hot water temperature on the collector efficiency and the heat capacity of collector

图 3 显示了集热器出口热水温度对集热器集热效率和集热量的影响。由图 3 可知, 模式I和模式II中集热器出口热水温度对集热效率的影响规律曲线是重合的, 在其他条件不变的情况下, 集热效率只与集热器出口热水温度有关, 集热器出口热水温度越大, 集热效率越小。从图 3 还可知, 模式I和模式II中集热器出口热水温度的增加, 对集热器集热量的影响是不一致的; 由公式 (2) 可知, 在太阳辐射强度不变的情况下, 集热量不仅与集热效率有关, 还与集热器面积相关。就模式I而言, 随着集热器出口热水温度的升高, 集热效率在降低, 集热量降低, 而集热器面积的增加会使得集热量增加, 集热器面积的改变对集热量的影响大于集热效率的改变对集热量的影响, 集热量呈增加趋势。另一方面, 就模式II而言, 当太阳辐射强度和集热器面积不变时, 集热量只与集热效率有关, 随着集热器出口热水温度的升高, 集热效率降低, 集热量降低。

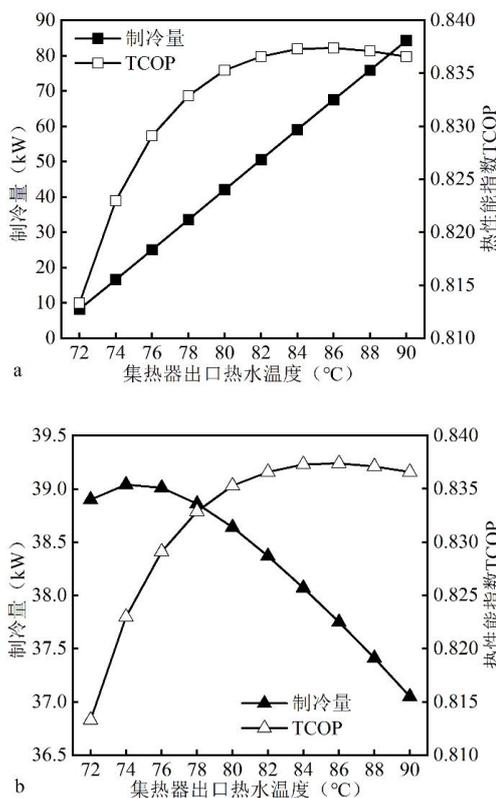


图 4 模式 I (a)、模式II (b) 下集热器出口热水温度对 SSAR 子系统制冷量和 TCOP 的影响

Fig.4 Effect of collector outlet hot water temperature on SSAR subsystem cooling capacity and TCOP in mode I(a) and mode II(b)

图 4 显示了集热器出口热水温度对 SSAR 子系统制冷量和热性能指数 (TCOP) 的影响。从图 4 可以看出, 集热器面积的增加, 模式I具有更多的能量, 相较于模式II在制冷量变化范围较大。如图 4a 所示, 在模式I中, 随着集热器出口热水温度的升高, SSAR 子系统制冷量呈快速增长趋势。随着集热器面积的增加, 集热量增加, 导致进入发生器的热量增加, 从而产生更多的制冷剂蒸汽, 因此 SSAR 子系统制冷量快速增长。在模式II中, 如图 4b 所示, 随着集热器出口热水温度的增加, SSAR 子系统的制冷量先缓慢增加, 随后急剧减小。发生温度的增加, 有助于提高吸收过程的速率, 制冷量的缓慢增加, 由于系统输入能量不变, 发生温度继续增加, 导致吸收式制冷系统的制冷效果会下降, 还会有结晶的风险。同时存在一个最佳集热器出口热水温度, 有助于提高吸收过程的速率, 使得 SSAR

子系统获得最大制冷量。此外，从图 4a 和图 4b 可以看出，在两种不同模式下，随着集热器出口热水温度的升高，TCOP 先呈快速增加后小幅减小的趋势。TCOP 是系统本身特性所决定的，所以随着集热器出口热水温度的升高，两种不同模式下的 TCOP 曲线规律一致。从图 4a 和 4b 还可以看出，两种不同模式下的 TCOP 整体上变化不大，但存在一个最佳集热器出口热水温度，使得 SSAR 子系统获得最佳 TCOP。由此可知，SSAR 子系统可以进行参数优化，以获得最佳的系统性能。

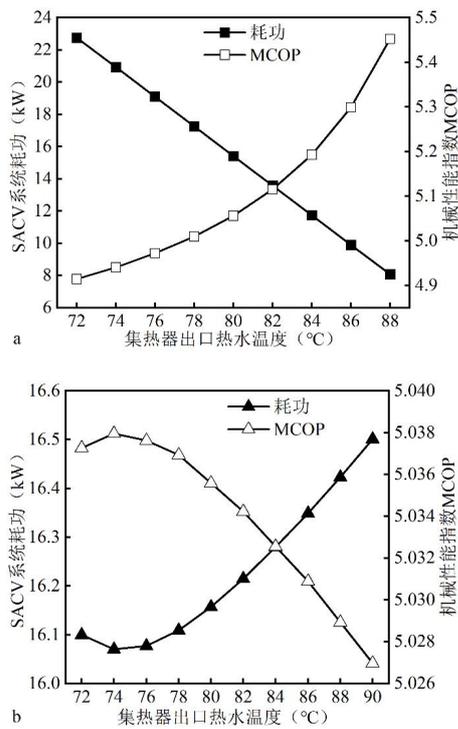


图 5 模式 I (a)、模式 II (b) 下集热器出口热水温度对 SACV 系统耗功和 MCOP 的影响

Fig.5 Effect of collector outlet hot water temperature on power consumption and MCOP of SACV system in mode I (a) and mode II (b)

图 5 显示了集热器出口热水温度对 SACV 系统耗功和机械性能指数 (MCOP) 的影响。由图 5a 可知，当集热器出口热水温度为 90℃时，集热器面积为 227.6m²，SSAR 子系统制冷量为 84.33kW 大于建筑空调显热负荷，所以不在考虑范围。由于模式 II 相较于模式 I 没有更多的能量输入，因此耗功量和 MCOP 变化范围较小。由图 5a 可知，随着集热器出口热水温度的增加，系统耗功量呈下降趋势。这是因为在模式 I 中，随着集热器面积的增加，

集热量增加，SSAR 子系统制冷量增加，SSAR 子系统所承担的建筑空调显热负荷增加，导致 VCR 子系统需要承担的建筑空调显热负荷减少，VCR 子系统耗功量减少，而 VMD 子系统耗功量不变，所以总耗功量减少。此外，由图 5b 可知，在模式 II 中，随着集热器出口热水温度的增加，SACV 系统的耗功量先缓慢减少，随后急剧增加，这是因为 SSAR 子系统制冷量的变化规律导致 VCR 子系统所承担的建筑空调显热负荷先缓慢减少随后急剧增加，VCR 子系统的耗功量也呈相同趋势，而在 VMD 子系统耗功量不变。同时存在一个最佳集热器出口热水温度，使得 SACV 系统获得最低耗功量。从图 4a 还可以看出，随着集热器出口热水温度的增加，MCOP 快速增加。这是因为耗功量的减少幅度大于剩余总负荷的减少幅度。从图 4b 还可以看出，随着集热器出口热水温度的增加，SACV 系统的 MCOP 先缓慢增加，随后急剧减少，与 SACV 系统的耗功量曲线规律呈相反规律。SACV 系统耗功量越低，MCOP 越大。因此存在一个最佳集热器出口热水温度，使得 SACV 系统获得最佳性能。

3.2 性能优化

空调系统在设计选择时，为取得系统运行的最佳性能和最低能耗，往往需要进行参数分析以获得最佳参数。从图 4 可以看出，在集热器出口热水温度变化范围内，存在一个最佳温度使得 SSAR 子系统获得最佳性能指数；从图 5b 可以看出，在集热器出口热水温度变化范围内，存在一个最佳温度使得 SACV 系统获得最低能耗，同时存在一个最佳温度使得 SACV 系统获得最佳性能指数。因此 SSAR 子系统和 SACV 系统具有优化的必要，具体优化结果如表 4 和表 5 所示。同时对优化前后系统性能进行对比，分析其性能差异。

从表 4 可以看出，在模式 I 中，为了获得最佳 SSAR 子系统性能指数，集热器面积需要增加 73.7%，集热器出口热水温度增加到 85.57℃。在模式 II 中，热水流量需要减少 42.34%，集热器出口热水温度增加到 85.54℃，可以看出，两种模式下最佳集热器出口热水温度是相差不大的。在模式 I 和模式 II 中，对集热效率影响几乎是一致的，分别减小了 2.67% 和 2.66%。但在模式 I 中，由于集热器面积的增加，使得集热量增加了 69.04%，而在模式 II

中, 集热量变化是很小的, 减少了 2.67%。由表 4 可知, 两种模式下对 SSAR 子系统的 TCOP 最佳值是一致的, 为 0.837, 增长率为 0.24%, 但模式 I 中 SSAR 子系统制冷量增长 69.64%, 而模式 2 中减少 2.35%。在系统耗功量方面, 在模式 I 中, 耗功量减少率为 36.18%, 而对于模式 II 来说, 耗功量增长率为 1.22%。同时对系统 MCOP 来说, 就模式 I 而言, MCOP 增长率为 4.71%, 而就模式 II 而言, MCOP

增长率为 -0.01%。因此, 容易得出, 模式 I 中对于 SSAR 子系统和 SACV 系统性能都起到促进作用, 而模式 II 中只对 SSAR 子系统性能起促进作用, 降低了 SACV 系统性能。虽然采用模式 I 的方式来改变集热器出口热水温度可以提升 SSAR 子系统和 SACV 系统性能, 但从经济性方面考虑, 集热器面积的增加导致系统初投资增加, 因此, 需要综合考虑系统性能和经济效益。

表 4 SSAR 子系统优化结果

Table 4 Optimization results of SSAR subsystem

参数	集热器出口热水 温度 (°C)	集热器面积 (m ²)	热水流量 (kg/s)	集热效率	集热量 (kW)	SSAR 制冷量 (kW)	TCOP	总耗功量 (kW)	MCOP
优化前	79.21	100	1.2	0.58	46.41	38.73	0.835	16.137	5.036
优化后 (模式 I)	85.57	173.7	1.2	0.5645	78.45	65.7	0.837	10.298	5.273
优化后 (模式 II)	85.54	100	0.6919	0.5646	45.17	37.82	0.837	16.334	5.031

从表 5 可以看出, 为了获得最佳 SACV 系统性能指数, 热水流量需要增加 109.75%。通过模式 II 优化系统, 使得集热效率、集热量、SSAR 子系统制冷量都增加 2.03%。但 SSAR 子系统 TCOP 减少了 1.2%。对 SACV 系统来说, 总耗功量减少了

0.43%, 系统 MCOP 增加了 0.04%。从整体上看, 除了 SSAR 子系统 TCOP 降低, 其余参数值都增加, 同时由于不需要增加集热器面积, 还具有一定的经济性优势。

表 5 SACV 系统优化结果

Table 5 Optimization results of SACV system

参数	集热器出口热水 温度 (°C)	集热器面积 (m ²)	热水流量 (kg/s)	集热效率	集热量 (kW)	SSAR 制冷量 (kW)	TCOP	总耗功量 (kW)	MCOP
优化前	79.21	100	1.2	0.58	46.41	38.73	0.835	16.137	5.036
优化后 (模式 II)	74.48	100	2.517	0.5918	47.35	39.05	0.825	16.068	5.038

4 结论

本文提出了太阳能吸收压缩制冷与真空膜除湿耦合系统, 研究了改变集热器面积或者热水流量对集热器出口热水温度的影响, 以及对集热器、SSAR 子系统和 SACV 系统性能的影响, 在此基础上对系统进行了优化, 最后将优化后的性能与优化前的性能进行了比较, 主要结论如下:

(1) 可通过改变集热器面积或热水流量的方式改变集热器出口热水温度。集热器面积的变化相较于热水流量的变化, 不仅是改变了集热器出口热水温度, 还增加了对整个系统的能量输入。

(2) 集热器出口热水温度的变化, 使得 SSAR 子系统存在最佳的 TCOP; 改变热水流量来改变集

热器出口热水温度, 使得 SACV 系统存在最佳 MCOP。

(3) 优化 SSAR 子系统性能时, 集热器面积增加 73.7%, SSAR 子系统性能提升 0.24%, 制冷量增长 69.64%, SACV 系统耗功量减少 36.18%, 性能提升 4.71%, 但集热器面积的增加导致初投资增加。优化 SACV 系统性能时, 热水流量增加 109.75%, SACV 系统性能提升 0.04%, 耗功量减少 0.43%, 但 SSAR 子系统性能降低 1.2%。

参考文献:

- [1] Alahmer A, Ajib S. Solar cooling technologies: State of art and perspectives[J]. Energy Conversion and

- Management, 2020,214:112896.
- [2] 宋梦宇,王林,曹艺飞,等.太阳能吸收/压缩复叠双温制冷系统特性研究[J].工程热物理学报,2021,42(7):1651-1658.
- [3] 何慧,王林,陈忠梅,等.高蒸发温度下小型太阳能单效溴化锂吸收式制冷机组性能试验研究[J].制冷与空调,2018,18(12):89-94.
- [4] Fong K F, Chow T T, Lee C K, et al. Solar hybrid cooling system for high-tech offices in subtropical climate—Radiant cooling by absorption refrigeration and desiccant dehumidification[J]. Energy Conversion and Management, 2011,52(8-9):2883-2894.
- [5] Habib M F, Ali M, Sheikh N A, et al. Building thermal load management through integration of solar assisted absorption and desiccant air conditioning systems: A model-based simulation-optimization approach[J]. Journal of Building Engineering, 2020,30:101279.
- [6] Fong K F, Lee C K, Chow T T, et al. Solar hybrid air-conditioning system for high temperature cooling in subtropical city[J]. Renewable Energy, 2010,35(11):2439-2451.
- [7] Chun L, Gong G, Peng P, et al. Research on thermodynamic performance of a novel building cooling system integrating dew point evaporative cooling, air-carrying energy radiant air conditioning and vacuum membrane-based dehumidification (DAV-cooling system)[J]. Energy Conversion and Management, 2021, 245:114551.
- [8] Liu D, Yuan L, Chun L, et al. Thermodynamic performance analysis of a novel air conditioning system integrating solar absorption compression refrigeration and vacuum membrane-based dehumidification (SACV)[J]. Energy and Buildings, 2023, 288:113021.
- [9] Yu J, Li Z, Chen E, et al. Experimental assessment of solar absorption-subcooled compression hybrid cooling system[J]. Solar Energy, 2019,185:245-254.
- [10] Chen E, Chen J, Jia T, et al. A solar-assisted hybrid air-cooled adiabatic absorption and vapor compression air conditioning system[J]. Energy Conversion and Management, 2021,250:114926.
- [11] Cimsit C, Ozturk I T. Analysis of compression-absorption cascade refrigeration cycles[J]. Applied Thermal Engineering, 2012,40:311-317.
-
- (上接第 298 页)
- [11] 张俊博.基于流固耦合的低真空管道磁悬浮列车传热仿真研究[D].北京:中国铁道科学研究院,2021.
- [12] Zhou YL, Bi HQ, Wang HL, et al. Fire characteristics of rescue station inside railway tunnel with semi-transverse ventilation[J]. Tunnelling and underground space technology, 2020,98,103303.
- [13] 尹惠.永磁同步电机损耗计算及温度场分析[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2015.
- [14] 李世武,熊莉芳.封闭方腔自然对流换热的研究[J].工业加热,2007,(3):10-13.
- [15] 杨小川.复杂热环境中大型薄壳体内的自然对流数值模拟[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2008.
- [16] 林晖,杨忠衡,秦旭进,等.低气压下低温空气水平圆管自然对流换热系数测量[J].制冷技术,2019,39(1):16-20.
- [17] 刘崇喜,卢军,郑洁.基于不同大气压力下多种翅片型式换热器的换热特性仿真模拟研究[J].制冷与空调,2018,32(3):215-220.