

光伏光热-热泵系统供热水箱与蓄热水箱匹配研究

曲明璐, 闫楠楠, 王海洋, 卢明琦
(上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093)

摘要: 为了研究光伏光热-热泵系统供热水箱与蓄热水箱大小匹配的问题, 利用 TRNSYS 软件建立了光伏光热-热泵系统的仿真模型。利用实测数据对仿真模型进行了验证, 结果表明误差均在合理值范围内, 认为构建的仿真模型具有准确性和可靠性。针对 100, 200, 300 L 这 3 种不同容量的供热水箱, 分别选取了 30, 60, 90 L/m² 的蓄热水箱来匹配各容量的供热水箱。对系统仿真模型进行了全年运行性能模拟, 并选用全年焓损作为评价指标对系统进行评价, 模拟结果表明, 对于 3 种不同容量的供热水箱, 蓄热水箱容量皆为 60 L/m² 时系统全年焓损值最小, 推荐匹配各容量供热水箱的蓄热水箱大小为 60 L/m²。

关键词: 太阳能; 光伏光热; 热泵; TRNSYS 软件; 焓损; 性能模拟
中图分类号: TH 3; TK 114 **文献标志码:** A

Matching of heating water tank and thermal storage tank in photovoltaic thermal-heat pump system

QU Minglu, YAN Nannan, WANG Haiyang, LU Mingqi
(School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: To study the problem of size matching of the heating tank and the thermal storage tank in the photovoltaic thermal-heat pump system, a simulation model of the photovoltaic and thermal-heat pump system was established by using TRNSYS software. The model was tested using the measured data, and the findings revealed that the errors were within reasonable bounds, indicating that the simulation model was accurate and dependable. Thermal storage tanks with the sizes of 30, 60, 90 L/m² were selected to match the heating water tanks with different capacities of 100, 200, 300 L, respectively, and an annual operating performance simulation of the system model was conducted using the system model. To evaluate the system, the annual exergy loss was chosen as the evaluation index. Simulation results show that the annual exergy loss of the system is the smallest when the capacity of the storage tank is 60 L/m² for all the three different capacities of the heating water tank. As a result, the thermal storage tank with a size of 60 L/m² is advised to match each capacity of the heating water tank.

Keywords: solar energy; photovoltaic thermal; heat pump; TRNSYS software; exergy loss; performance simulation

收稿日期: 2021-11-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51906153)

第一作者: 曲明璐(1984-), 女, 副教授。研究方向: 空气源热泵、建筑设备热质交换。E-mail: quminglu@126.com

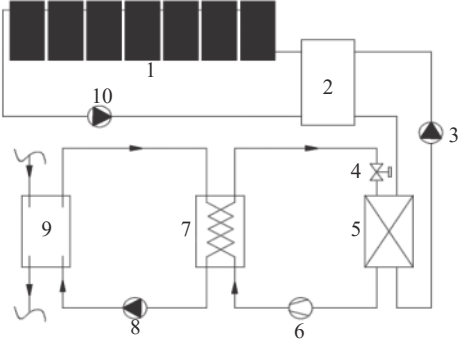
随着我国城镇化迅速发展,建筑规模也迅速增长,消耗了大量建材,产生了大量的能耗与碳排放,这些建筑能耗与碳排放在我国全社会占有相当的比例^[1-2]。当今世界建筑正处于高增长期,预计从现在到2050年,全球新增建筑面积将是中国现有存量的2.5倍(即1500~2000亿)^[3]。不断增长的建筑面积导致了更多的建筑运行用能,使得采暖、空调、生活热水、家用电器等终端用能需求和产生的碳排放也不断上升^[3]。对此,我国对低碳发展给出了明确的目标和时间,将力争在2030年前实现碳达峰,在2060年前实现碳中和^[4]。可再生能源对促进建筑节能具有重要意义,是替代化石能源实现碳达峰、碳中和目标的重要途径。

太阳能作为可再生的清洁能源在能源供给结构中的应用尤为广泛。近几年国内外学者对光伏光热-热泵(PV/T-HP)系统进行了大量的理论和实验研究^[5-7]。崔云翔等^[8]对太阳能-地源热泵不同运行模式进行了研究,得出了上海地区太阳能-地源热泵系统的较佳流量配比。金满等^[9]对太阳能光伏光热系统辅助地源热泵进行了供暖模拟研究,结果表明,该系统整体性能系数较传统地源热泵均有很大的提升。曲明璐等^[10]对PV/T-HP系统的蓄热水箱大小进行了全天运行模拟,并对集热水泵流量进行了优化。在PV/T-HP系统中,蓄热水箱的大小直接影响集热器的电效率与热泵机组的制热效率。然而目前对PV/T-HP系统供热水箱与蓄热水箱大小匹配的研究还相对较少。

为得到不同容量供热水箱最佳匹配的蓄热水箱大小,本文通过TRNSYS软件对不同容量下的供热水箱匹配不同容量下的蓄热水箱进行了全年的系统运行性能模拟,以焓损作为评价指标,通过模拟结果得到全年最小焓损的蓄热水箱的容量,为后续选择供热水箱与蓄热水箱匹配问题提供参考。

1 实验系统

图1是光伏光热-热泵系统的系统图,该系统主要包括太阳能光伏光热组件子系统、水源热泵子系统、生活热水子系统3部分。其中,系统光伏板面积为9.18 m²,热泵额定制热量为3 kW,供热水箱容积为200 L,蓄热水箱容积为500 L。系统的工作原理和相关部件介绍可参见文献^[10]。



1. 光伏光热组件 2. 蓄热水箱 3. 冷却水泵 4. 节流阀
5. 水冷蒸发器 6. 压缩机 7. 冷凝器 8. 热水泵 9. 供热水箱
10. 集热循环水泵

图1 光伏光热-热泵系统图

Fig. 1 Photovoltaic thermal-heat pump system diagram

2 系统综合效率分析

由于电能和热能的品位不同,太阳能光伏光热组件的电效率与热效率以及热泵机组的制热效率无法采用统一标准去衡量,因此,本文考虑使用焓的概念,通过计算系统整体的焓损来评价光伏光热-热泵系统的综合性能。

在PV/T-HP系统中焓损 E_l 为消耗焓与输出焓的差值,如式(1)所示。该公式是由焓平衡公式^[11-12]得到,即所有的输入焓减去所有的输出焓等于焓损失。

$$E_l = (P_W + P_H + E_s) - (P_0 + E_{X,C}) \tag{1}$$

式中: P_0 为输出焓包括发电焓; $E_{X,C}$ 为输出热量焓; P_W 为消耗焓包括水泵消耗焓; P_H 为热泵机组消耗焓; E_s 为太阳能辐射焓。

由于本文中系统光伏组件倾角、面积及各项参数均相同,因此,太阳能辐射焓数值没有差异。

在式(1)中各项焓的计算如下:系统中发电焓 P_0 即为系统发电量,各水泵消耗焓 P_W 及热泵机组消耗焓 P_H 皆为各自运行所耗电量,输出热量焓 $E_{X,C}$ 包括热泵制热焓 E_X 与PV/T组件产热焓 E_C 。

$$E_X = Q_H \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) \tag{2}$$

式中: Q_H 为热泵的制热量; T_0 为环境温度; T 为热泵热水温度。

$$E_C = Q_e \left(1 - \frac{T_0}{T_c} \right) \tag{3}$$

式中: Q_e 为集热盘管中循环水的得热量; T_c 为PV/T组件出口水温。

$$E_s = Q_s \left[1 - \frac{4}{3} \frac{T_0}{T_s} + \frac{1}{3} \left(\frac{T_0}{T_s} \right)^4 \right] \quad (4)$$

式中: Q_s 为太阳能 PV/T 组件有效得热量; T_s 为太阳辐射温度, 取 $T_s = 6\,000\text{ K}$ 。

PV/T 组件光电转换效率 η_P 为光电输出功率与太阳有效热能的比值, 热泵的制热量 Q_H 为供热侧进出水管中循环水得热量。

$$n_P = W_P/Q_s \quad (5)$$

式中, w_p 为 PV/T 组件的输出功率, 可通过光伏发电输出的电压 U 和电流 I 相乘得到。

$$Q_H = m_L c (T_{\text{out}} - T_{\text{in}}) \quad (6)$$

式中： m_L 为冷凝水循环流量； c 为水的比热容； T_{out} ， T_{in} 分别为冷凝水进、出口水温。

水源热泵的制热效率 COP 计算式为

$$COP = Q_H/W \quad (7)$$

式中, W 为压缩机功率。

3 系统性能模拟与结果分析

选用 TRNSYS 软件来进行仿真模拟。该仿真模型中光伏光热组件选用 TYPE50 模块, 水源热

泵模块采用在 TRNSYS 平台上自行研发的 TYPE 225 模块来模拟水-水源热泵机组的运行。系统模拟的输入参数如表 1 所示。模型中设备参数的设置与实验中设备参数保持一致。图 2 为光伏光热-热泵系统仿真模型图。

表 1 系统输入参数
Tab.1 Input parameters of the system

参 数	数值
光伏板面积	9.18 m^2
流体比热容	$4.19 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
光伏板倾斜角	22°
基准发电效率所对应的温度	25°C
光伏板发射率	0.09
温度对发电效率影响因数	0.0032
热泵额定制热量	3 kW
热泵制热模式下的额定COP	4
热泵制热模式下额定冷凝器流量	520 kg/h
热泵制热模式下额定蒸发器流量	520 kg/h
热泵制热模式下额定供水温度	55°C

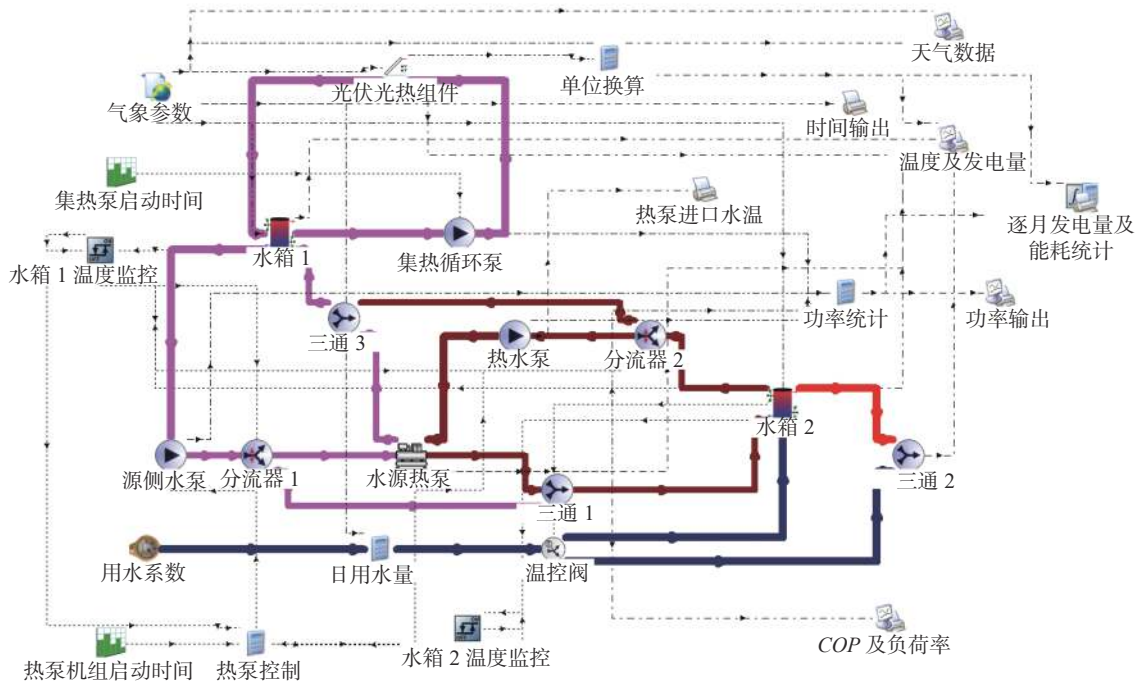


图 2 光伏光热-热泵系统仿真模型

Fig.2 Simulation model of the photovoltaic thermal-heat pump system

3.1 系统模拟验证

在已构建的系统仿真模型的基础上, 将 2014

年 12 月 21 日实验装置的实验数据与模型输出的参数进行对比分析验证。图 3 为实验当天逐时室

外环境温度和太阳辐射强度变化。全天最高温度和最大辐射强度均出现在 11:45，分别是 8.5 ℃ 和 553 W/m²。

实验与模拟系统均在 9:00 开启热泵机组和集热循环泵。为尽量保证实验与模拟的一致性，各部件初始参数、室外气象参数、仿真模型运行逻辑都与实验一致。集热循环泵开启后系统开始收集光热并且铜管内循环水开始为光伏板表面降温，蓄热水箱温度升高。当供热水箱温度超过 50 ℃ 时，热泵机组停机，系统运行行为直供模式。集热循环泵全天运行直至 19:00 系统全部关闭。具体实验步骤和测试设备见文献 [10]。

从图 4 和图 5 中可以看出，供热水箱、蓄热水箱和发电量的模拟数据与实验数据之间的平均误差分别为 15.83%，7.86% 和 13.26%。模拟数据与实验数据下两水箱温度变化曲线基本吻合，发电量曲线基本吻合，误差均在合理值范围内。因此，可以认为本文所构建的光伏光热—热泵系统仿真模型具有准确性和可靠性，可以用来进行后续研究。

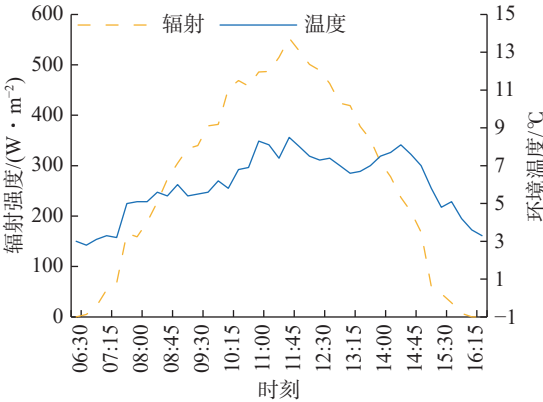


图 3 实验的气象参数

Fig.3 Meteorological parameters of the experiment

3.2 模拟工况

相关研究表明，太阳能集热器的集热面积对应所需的蓄热水箱容量^[13] 大约为 40~100 L/m²，考虑到 PV/T 组件表面有一层单晶硅，其主要依靠传热来加热热水。所以，光伏光热组件的集热效率要低于太阳能平板集热器，而一般平板集热器集热效率在 40%~80% 范围内^[14]。综合考虑，本文选取 100，200，300 L 这 3 种不同容量的供热水箱，通过系统仿真模拟来研究各容量供热水箱在单位 PV/T 集热器面积水箱容量 30，60，90 L/m² 时的匹配情况。选取上海地区典型气象年来进行

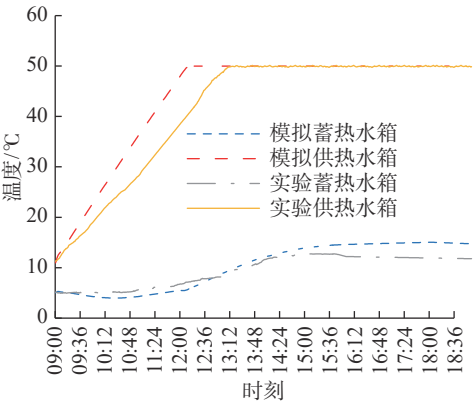


图 4 两水箱温度的实验与模拟数据对比

Fig. 4 Comparison of experimental and simulated data for the temperature of two water tanks

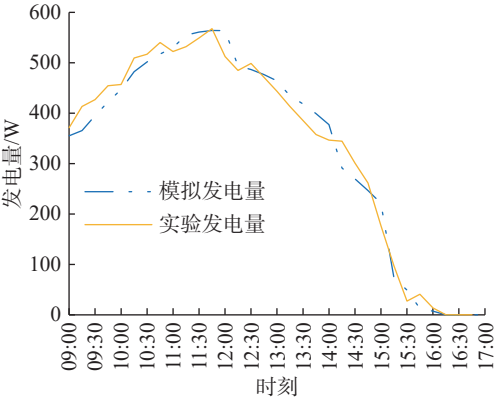


图 5 发电量的实验与模拟数据对比

Fig. 5 Comparison of experimental and simulated data of power generation

全年的系统运行性能模拟分析。本文此部分以供热水箱容量为 100 L 的模拟结果进行分析。

3.3 模拟结果分析

图 6 是 3 种蓄热水箱容量下系统月平均电效率的变化情况。由此可见，3 种容量下系统的电效率变化趋势一致，随着夏季太阳辐射强度的增强，光伏光热组件的温度升高，导致电效率在夏季有下降的趋势，均在 7 月达到了最低值，分别为 11.43%，11.52%，11.58%。热泵运行阶段蓄热水箱越小，温度下降得越快，电效率越高；热泵停机后，蓄热水箱容积越大，温度上升得越慢，电效率越高。这是因为蓄热水箱温度降低则集热循环水温度降低，集热循环水流经光伏板表面会降低光伏板的温度，从而使光伏组件发电效率升高，反之亦然。而热泵机组运行的时间段在一天中占的比例越少，所以，考虑平均全年整体平均电效率时，蓄热水箱容积越大，相应的电效率就会越高。从图 6 中也可以看到，90 L/m² 时系统的

电效率整体大于其他 2 种。在整个模拟过程中, 30, 60, 90 L/m² 蓄热水箱对应的系统年平均电效率分别为 12.07%, 12.16%, 12.20%。

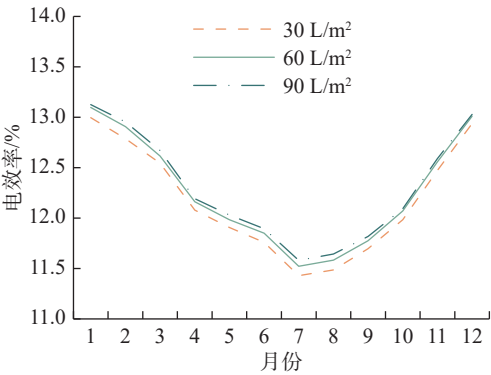


图 6 不同容量时系统电效率逐月变化情况
Fig.6 Monthly change in electrical efficiency of the system under different capacities

图 7 和图 8 分别为 100 L 供热水箱下, 蓄热水箱不同容量时热泵机组逐月运行能耗与 COP 变化情况。从图中可以看出, 由于蓄热水箱温度超过设定温度 50 ℃, 90 L/m² 时系统在 7 月和 8 月切换成直供模式, 因此, 热泵无运行能耗和 COP 值。3 种容量下热泵机组的总能耗为 470.56, 445.13, 447.74 MJ; 年平均 COP 分别为 6.90, 7.14, 7.15。可以看到 3 种不同容量下蓄热水箱容量越大, 系统年平均 COP 越高。

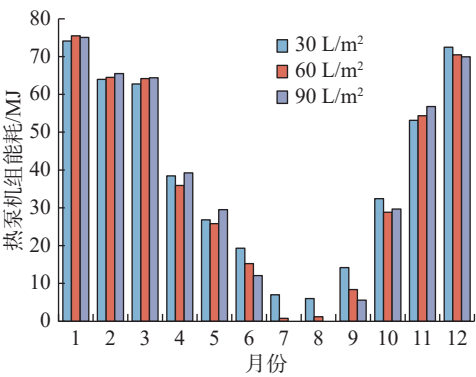


图 7 不同容量时热泵机组逐月运行能耗
Fig.7 Monthly operating energy consumption of heat pump units under different capacities

当供热水箱容量为 200, 300 L 时, 系统年平均电效率和 COP 值如表 2 所示。通过对结果进行分析可知, 系统年平均电效率的整体变化趋势均与 100 L 供热水箱一致, 且都是蓄热水箱容量 30 L/m² 时最小, 90 L/m² 时最大; 年平均 COP 均在蓄热水箱 30 L/m² 时最小, 90 L/m² 时最大。由此可见,

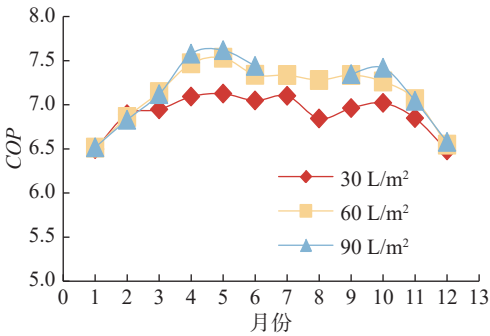


图 8 不同容量时系统全年 COP 变化情况
Fig.8 Annual COP change of the system under different capacities

表 2 不同容量下系统电效率和 COP
Tab.2 Electrical efficiency and COP of the system under different capacities

蓄热水箱大小/(L·m ⁻²)	供热水箱大小/L	年平均电效率/%	COP
30	200	12.15	6.37
	300	12.17	6.08
60	200	12.23	6.65
	300	12.24	6.41
90	200	12.26	6.68
	300	12.28	6.44

蓄热水箱容量越大, 系统年平均电效率越高, 热泵机组年平均 COP 越大。

为判断不同容量下系统全年的运行性能并使结果更为直观, 采用上文提到的焓损作为系统性能评价指标, 不同容量下系统各焓值如表 3 所示。

从表 3 可以看出, 90 L/m² 时系统年平均电效率最高, 所以, 其发电量焓高于其他 2 个。3 种水箱容积情况下热泵年运行总时长相差不大, 30 L/m² 时热泵机组运行时间略高于其余 2 种容量的系统, 因此, 3 个系统的输出热量焓相差不大, 90 L/m² 时的系统全年输出焓分别比 30 L/m² 与 60 L/m² 高了 53.8 MJ 和 21.1 MJ。消耗焓中源侧水泵耗焓的差别较为明显, 主要是因为夏季系统大部分时间处于直供模式下, 此时蓄热水箱与供热水箱间仅通过源侧水泵进行换热, 蓄热水箱容积越小, 其温度升高越快, 水箱内水温更高, 换热时间越短, 进而源侧水泵开启时间也越短, 其耗电量也越少。因此, 30 L/m² 时源侧水泵全年耗焓要明显小于其他 2 种容量。综合输出焓与消耗焓, 蓄热水箱容量为 60 L/m² 时的系统全年焓损分别比 30, 90 L/m² 降低了 9.96%, 5.61%。

表 3 不同容量下系统各焓值汇总

Tab.3 Summary of each exergy value of the system under different capacities

MJ

蓄热水箱大小/ (L·m ⁻²)	输出焓			消耗焓						焓损
	发电量焓	输出热量焓	总计	集热泵焓	源侧水泵焓	热水泵焓	热泵机组焓	太阳能辐射焓	总计	
30	5314.2	265.9	5580.1	854.1	98.8	47.2	470.6	4482.94	5953.64	373.54
60	5352.8	260.0	5612.8	854.1	122.2	44.8	445.1	4482.94	5949.14	336.34
90	5371.3	262.6	5633.9	854.1	160.5	45.0	447.7	4482.94	5990.24	356.34

综合上述 3 种蓄热水箱容量下系统全年运行情况分 析，水箱容量越大，其系统全年平均电效率越高，热泵机组年平均 *COP* 越大，但直供模式下供热水箱到达设定温度的时间也越长。综合计算焓损可以发现，60 L/m² 时系统全年焓损最小。

当供热水箱容量为 200，300 L 时，各容量蓄

热水箱的数据如表 4 和表 5 所示。由此可见，蓄热水箱大小为 60 L/m² 时系统全年焓损最小，分别为 389.94，402.64 MJ，而且供热水箱容量 200 L 时，60 L/m² 分别比 30，90 L/m² 低 12.68%，9.01%，供热水箱容量为 300 L 时，60 L/m² 分别比 30，90 L/m² 低 1.49%，0.67%。

表 4 供热水箱容量 200 L 时系统各焓值汇总

Tab.4 Summary of each exergy value of the system with the heating tank capacity of 200 L

MJ

蓄热水箱大小/ (L·m ⁻²)	输出焓			消耗焓						焓损
	发电量焓	输出热量焓	总计	集热泵焓	源侧水泵焓	热水泵焓	热泵机组焓	太阳能辐射焓	总计	
30	5360	423.8	5783.8	854.1	99.8	51.9	757.4	4482.94	6246.14	462.34
60	5390.5	426.2	5816.7	854.1	102.7	49.8	729.8	4482.94	6219.34	402.64
90	5406.2	435.2	5841.4	854.1	145.1	50.2	738.9	4482.94	6271.24	429.84

表 5 供热水箱容量 300 L 时系统各焓值汇总

Tab.5 Summary of each exergy value of the system with the heating tank capacity of 300 L

MJ

蓄热水箱大小/ (L·m ⁻²)	输出焓			消耗焓						焓损
	发电量焓	输出热量焓	总计	集热泵焓	源侧水泵焓	热水泵焓	热泵机组焓	太阳能辐射焓	总计	
30	5360	423.8	5783.8	854.1	99.8	51.9	757.4	4482.94	6246.14	462.34
60	5390.5	426.2	5816.7	854.1	102.7	49.8	729.8	4482.94	6219.34	402.64
90	5406.2	435.2	5841.4	854.1	145.1	50.2	738.9	4482.94	6271.24	429.84

4 结 论

利用 TRNSYS 软件搭建了光伏光热-热泵系统的仿真模型，选取不同容量的供热水箱匹配不同容量的蓄热水箱，对系统进行全年模拟。

a. 水箱容量越大，系统全年的平均电效率越高，热泵机组的年平均 *COP* 越大，但是，在直供模式下供热水箱达到设定温度的时间越长。

b. 以全年焓损作为系统运行性能评价指标，通过计算不同容量供热水箱下系统的全年焓损可知，100，200，300 L 供热水箱容量下最匹配的蓄热水箱大小均为 60 L/m²，此时系统运行性能更佳。

本文仅对蓄热水箱容量为 30，60，90 L/m² 的 3 种工况进行了分析，接下来的工作将探究是否可能存在最优的蓄热水箱容量使得全年焓损最小。

参考文献：

[1] ZHANG Y, YAN D, HU S, et al. Modelling of energy consumption and carbon emission from the building construction sector in China, a process-based LCA approach[J]. *Energy Policy*, 2019, 134: 110949.

[2] 胡姗, 张洋, 燕达, 等. 中国建筑领域能耗与碳排放的界定与核算 [J]. *建筑科学*, 2020, 36(S2): 288-297.

[3] 龙惟定, 梁浩. 我国城市建筑碳达峰与碳中和路径探讨 [J]. *暖通空调*, 2021, 51(4): 1-17.

- [4] 向俊杰. 从碳达峰碳中和看节能监察管理[J]. 上海节能, 2021(6): 570-575.
 - [5] MORENO D, FERNÁNDEZ M, ESQUIVIAS P M. A comparison of closed-form and finite-element solutions for heat transfer in a nearly horizontal, unglazed flat plate PVT water collector: performance assessment[J]. *Solar Energy*, 2017, 141: 11-24.
 - [6] AL-UGLA A A, EL-SHAARAWI M A I, SAID S A M, et al. Techno-economic analysis of solar-assisted air-conditioning systems for commercial buildings in Saudi Arabia[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 54: 1301-1310.
 - [7] 荆树春, 朱群志, 张静秋, 等. 光伏光热一体化装置与热泵结合系统的影响因素分析[J]. *可再生能源*, 2013, 31(6): 1-4.
 - [8] 崔云翔, 蔡颖玲. 上海地区太阳能-地源热泵冬季联合运行试验研究[J]. *流体机械*, 2019, 47(2): 65-69.
 - [9] 金满, 徐洪涛, 张剑飞, 等. 太阳能辅助地源热泵联合供暖系统模拟研究[J]. *上海理工大学学报*, 2021, 43(2): 111-117.
 - [10] 曲明璐, 卢明琦, 宋小军, 等. 蓄热型太阳能光伏光热组件与热泵一体化系统模拟研究[J]. *流体机械*, 2020, 48(8): 82-88.
 - [11] DIKICI A, AKBULUT A. Performance characteristics and energy-exergy analysis of solar-assisted heat pump system[J]. *Building and Environment*, 2008, 43(11): 1961-1972.
 - [12] TIWARI A, DUBEY S, SANDHU G S, et al. Exergy analysis of integrated photovoltaic thermal solar water heater under constant flow rate and constant collection temperature modes[J]. *Applied Energy*, 2009, 86(12): 2592-2597.
 - [13] 郑瑞澄. 民用建筑太阳能热水系统工程技术手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 73-82.
 - [14] XU G Y, DENG S M, ZHANG X S, et al. Simulation of a photovoltaic/thermal heat pump system having a modified collector/evaporator[J]. *Solar Energy*, 2009, 83(11): 1967-1976.
- (编辑: 石 瑛)

(编辑:石 瑛)

[上接第 356 页]

- [3] 俞钟行. 拉依达准则用于剔除物探数据中的坏值 [J]. 物探与化探, 1989, 13(3): 238–240.
 - [4] 金铮, 张行南, 夏达忠, 等. 基于多种平滑算法的三峡水库反推入库流量消噪 [J]. 中国农村水利水电, 2022(3): 48–53.
 - [5] BREUNIG M M, KRIEGEL H P, NG R T, et al. LOF: identifying density-based local outliers[C]//Proceedings of the 2000 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data. Dallas: ACM Press, 2000: 93–104.
 - [6] TROYANSKAYA O, CANTOR M, SHERLOCK G, et al. Missing value estimation methods for DNA microarrays[J]. Bioinformatics, 2001, 17(6): 520–525.
 - [7] 周绪川, 蔡利平. 基于局部异常因子的无监督学习集成异常检测 [J]. 西南民族大学学报·自然科学版, 2012, 38(3): 444–448.
 - [8] 庾婧艺. 改进 RBF 神经网络控制水厂混凝剂投加量的研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2021: 14–16.
 - [9] 蒋慧云, 吕惠进, 李佐卿. 基于灰色关联的太湖流域水质评价 [J]. 水资源与水工程学报, 2012, 23(1): 161–163.
 - [10] 李炳军, 朱春阳, 周杰. 原始数据无量纲化处理对灰色关联度的影响 [J]. 河南农业大学学报, 2002, 36(2): 199–202.
 - [11] 贺晓娟, 袁本松, 黄保平, 等. 高 pH 湖泊水处理中残余铝的影响因素及控制措施 [J]. 净水技术, 2019, 38(3): 51–55.
 - [12] 许泽彬, 韩永辉, 刘婉琼, 等. 在线混凝—超滤工艺处理滤池反冲洗废水中试研究 [J]. 中国给水排水, 2021, 37(23): 15–20.
 - [13] 邱锡鹏. 神经网络与深度学习 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2020.
 - [14] BERGSTRA J, BARDENET R, BENGIO Y, et al. Algorithms for hyper-parameter optimization[C]//Proceedings of the 24th International Conference on Neural Information Processing Systems. Granada, Spain: Curran Associates Inc., 2011: 2546–2554.
 - [15] 李亚茹, 张宇来, 王佳晨. 面向超参数估计的贝叶斯优化方法综述 [J]. 计算机科学, 2022, 49(S1): 86–92.
- (编辑: 丁红艺)

(编辑: 丁红艺)