

太阳能辅助地源热泵联合供暖系统模拟研究

金 满¹, 徐洪涛¹, 张剑飞², 饶江伟¹

(1. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093; 2. 西安交通大学 能源与动力工程学院, 西安 710049)

摘要: 为了改善寒冷季节建筑物供暖能耗偏高的问题, 利用太阳能光伏光热系统辅助地源热泵 (PV/T-GSHP) 进行联合供暖。以北京市某民用节能建筑为研究对象, 利用瞬态系统模拟程序 TRNSYS 对 PV/T-GSHP 系统在供暖季 (2018-11—2019-03) 的应用进行了模拟分析。针对当地气象参数和系统设备性能指标, 建立了 4 种不同的温度调控策略, 并与传统的地源热泵系统 (GSHP) 模拟结果进行对比。研究结果表明: PV/T 系统的光电、光热转换效率分别达到了 15.0% 和 46.6%; 与 GSHP 系统相比, PV/T-GSHP 系统的性能系数和整体性能系数平均提升了 6.9% 和 10.3%; 通过 10 a 的长期运行模拟, PV/T-GSHP 系统的土壤温度降幅仅为 8.0%。

关键词: 太阳能; 光伏光热系统; 地源热泵; 性能系数; TRNSYS 软件

中图分类号: TK 221 **文献标志码:** A

Numerical study on the combined heating system of a ground-source heat pump assisted by the solar energy

JIN Man¹, XU Hongtao¹, ZHANG Jianfei², RAO Jiangwei¹

(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;
2. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In order to solve the high energy consumption of buildings in cold season, a ground-source heat pump assisted by the solar photovoltaic/thermal system (PV/T-GSHP) can be used. A civil building in Beijing was taken as the research object. The transient system simulation code TRNSYS was adopted to analyze the PV/T-GSHP system performance during heating season (November 2018 to March 2019). Four different temperature control strategies were established based on the local climatic conditions and performance parameters of system equipments. The numerical results were also compared with those of the traditional ground-source heat pump (GSHP) system. The results indicate that the photoelectric and photothermal conversion efficiencies of the PV/T system reach 15.0% and 46.6%, respectively. Compared with the traditional GSHP system, the coefficient of performance and the overall coefficient of performance of the system are increased by 6.9% and 10.3%, respectively. The soil temperature drop of the PV/T-GSHP system is only 8.0% according to a long-term simulation of 10 years.

收稿日期: 2020-03-26

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFF0216000); 上海市国际科技合作基金资助项目 (18160743600)

第一作者: 金 满 (1994-), 男, 硕士研究生. 研究方向: 新能源利用与传热传质研究. E-mail: jinmanstudy@163.com

通信作者: 徐洪涛 (1976-), 男, 副教授. 研究方向: 新能源利用与传热传质研究. E-mail: htxu@usst.edu.cn

Keywords: *solar energy; photovoltaic/thermal system; ground-source heat pump; coefficient of performance; TRNSYS software*

随着我国对化石能源的大量开采和利用，能源消耗引起的环境污染问题得到了人们越来越多的关注。其中，建筑能耗约占国内能源消耗总量的三分之一^[1]。因此，将可再生能源应用于建筑领域逐渐成为节能研究的重点^[2]。目前，在建筑领域中利用清洁能源供热的方式主要为太阳能集热和地源热泵。太阳能资源丰富、便于采集，但作为单一热源使用具有寿命短、间歇性和波动性较大、易受季节和天气因素影响等问题。地源热泵通过土壤中埋管换热器的吸放热进行制冷或供暖，具有节能环保、维护费用低、寿命长等优点，但地源热泵长期运行易导致埋管周围土壤冷热失衡、系统换热效率降低等问题。因此，太阳能和地源热泵的联合应用技术既能够充分发挥两者各自的优势，又能弥补各自系统的不足，进而成为学者们研究的热点^[3-5]。

在试验研究方面，陆游^[6]对太阳能-地源热泵系统的运行模式进行了试验研究，研究表明，若该系统在供暖初期承担整个节能楼的热负荷，既不会降低机组的性能系数，还能够有效避免系统经过长期运行存在的热失衡现象。崔云翔等^[4]对上海地区不同的太阳能-地源热泵联合运行模式进行了试验研究，研究表明，在并联运行模式下，蒸发器出口流体进入蓄热水箱和埋管的比例相同时，系统的运行模式为上海地区运行的最佳模式。刘逸等^[7]利用经济评价方法，通过与地源热泵、燃油锅炉、燃气锅炉和电锅炉的对比，得出太阳能-地源热泵不仅运行费用较低，且一次能源利用率最高。

在系统仿真方面，瞬时系统模拟程序 TRNSYS^[8]由于其模块化的分析方式，被广泛应用于建筑能耗模拟研究中。Kjellsson 等^[9]利用 TRNSYS 软件对太阳能集热器与地源热泵系统的不同组合形式进行了模拟研究，发现该联合系统在夏季利用太阳能提供生活热水、在冬季给土壤进行补热是最佳的组合形式。Rad 等^[10]采用 TRNSYS 软件对加拿大某建筑物的太阳能-地源热泵联合供暖系统进行了可行性分析，结果表明，该联合系统能够在

利用太阳能的同时，将多余的热量储存到土壤中，使埋管换热器的长度大幅度减少。郝红等^[11]利用 TRNSYS 软件对太阳能-地源热泵与热网互补供暖系统进行仿真模拟，结果表明，该互补供暖系统同地源热泵与热网互补供暖系统相比，平均性能系数由 3.167 增加到 4.650。Calise 等^[12]利用 TRNSYS 软件对太阳能辅助热泵系统进行了模拟研究，结果表明，该系统的热效率和电效率分别达到 40% 和 10% 以上。

为了验证 TRNSYS 软件模拟结果的可靠性，诸多学者将模拟与试验结果进行对比验证。邹晓锐等^[13]以长沙地区某高校学生宿舍的复式热水系统为研究对象，利用 TRNSYS 软件对不同组合下的系统性能进行了模拟研究，并对热泵机组及埋管的模拟值与实测值进行了对比分析，结果表明，太阳能跨季地下蓄热技术能够使热泵机组长期稳定运行，且模拟值与实测值的变化趋势相同，两者相对误差较小。季永明等^[14]对大连某公共建筑的太阳能辅助地源热泵系统进行设计，采用 TRNSYS 软件对系统长期运行工况进行模拟，结果表明，系统实际供热量模拟结果与建筑负荷变化趋势一致，平均误差为-4%，且冬季热泵机组的性能系数显著提高。王恩宇等^[15]以天津地区某高校实验楼的太阳能-地源热泵供热系统为研究对象，利用 TRNSYS 软件对该系统的运行策略进行模拟研究，结果表明，基于该实际工程，系统的最优运行策略为集热器出口与水箱出口温差大于 15 ℃ 时启动集热，小于 2 ℃ 时停止集热。

综上所述，大部分学者对太阳能-地源热泵系统的组合形式、性能提升等方面进行了研究，而针对北方寒冷地区结合不同温控策略的太阳能光伏光热系统辅助地源热泵进行联合供暖的研究较少。因此，本文基于北京市某民用节能建筑，结合不同的温控策略设计了太阳能光伏光热辅助地源热泵 (PV/T-GSHP) 联合供暖系统，利用瞬时系统模拟程序 TRNSYS 进行模拟计算，分析该联合供暖系统的节能潜力及长期运行后的土壤温度变化，为实际工程应用提供参考。

1 研究对象

将设计的 PV/T-GSHP 系统拟应用于北京市某民用节能建筑, 该建筑主体为钢筋混凝土结构, 共有 4 层, 采暖面积约 350 m², 采暖时间为 2018—11—15—2019—03—15。

根据相关标准^[16]并结合该民用建筑实际需求, 确定供暖季室内设计温度为 18 ℃。建筑围护结构主要参数如表 1 和表 2 所示。

表 1 窗墙面积比
Tab.1 Area ratio of window to wall

楼层	东墙	南墙	西墙	北墙
1层	0.08	0.20	0.12	0.34
2层	0.08	0.15	0.09	0.35
3层	0.08	0.28	0.15	0.36

表 2 围护结构传热系数
Tab.2 Heat transfer coefficient of the enclosure structure

类型	外墙	外窗	外门	屋顶
传热系数/(W·m ⁻² ·K ⁻¹)	0.269	2.500	1.515	0.800

利用 TRNBuild 平台建立该民用建筑热负荷模型, 利用热流平衡法计算 2880 h 建筑逐时热负荷, 结果如图 1 所示。由图 1 可知, 该建筑热负荷最大值为 15.9 kW, 最大单位热负荷指标为 45.4 W/m²。

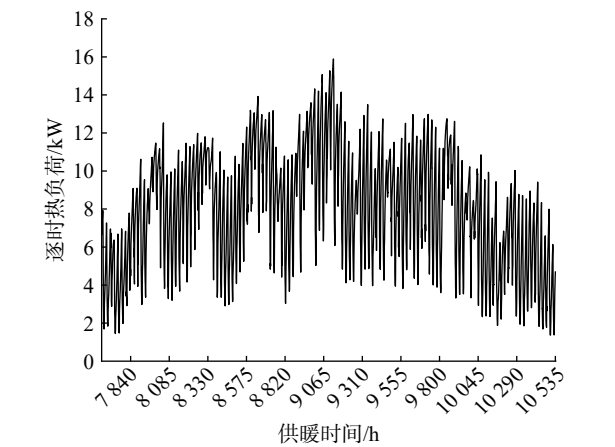


图 1 节能建筑供暖季逐时热负荷
Fig.1 Hourly heat load of the energy-saving building in heating season

2 系统设计及模拟

2.1 系统原理

PV/T-GSHP 系统主要由太阳能光伏光热系统

和地源热泵系统组成。其中, 太阳能 PV/T 系统主要由 PV/T 集热器、分层水箱和循环水泵等组成, 而地源热泵系统主要由地埋管、地源热泵、循环水泵和热用户(民用节能建筑)等组成。太阳能 PV/T 系统与地源热泵系统之间的热量交换通过板式换热器进行。PV/T-GSHP 系统原理如图 2 所示。在太阳能集热循环中, 分层水箱热侧出口的循环介质通过 PV/T 集热器, 将吸收到的太阳能热量传递到分层水箱中。PV/T 集热器产生的电能则储存到蓄电池中, 作为系统的备用电源。在板式换热器中, 分层水箱冷侧出口温度较高的循环介质将在板式换热器中加热地源热泵源侧循环介质; 在地源热泵循环中, 热泵源侧出口循环介质经地埋管换热器和板式换热器加热, 使得地源热泵负荷侧出口的循环介质温度提高, 经热用户释放热量, 再回流至地源热泵。

2.2 系统部件的选择

2.2.1 PV/T 集热系统的设计

a. 平板型集热器的面积计算^[17]。

$$A_{c,s} = \frac{86\,400 Q_J f D_s}{J_a \eta_{cd} (1 - \eta_L) [D_s + (365 - D_s) \eta_s]} \tag{1}$$

式中: $A_{c,s}$ 为集热器总面积; f 为太阳能保证率; Q_J 为建筑物热负荷; J_a 为集热器采光面上的年平均日太阳能辐射量; η_{cd} 为集热器平均集热效率; η_L 为管路和储热设备的热损失率; D_s 为当地采暖期天数; η_s 为季节蓄热系统效率。

经计算得到集热器总面积为 40 m², 本系统为了在冬季获得良好的供暖效果, 确定最终集热器总面积为 48 m²。

b. 分层水箱的容积计算^[17]。

$$V = A_{c,s} B \tag{2}$$

式中: V 为分层水箱的容积; B 为单位采光面积的分层水箱容积系数。

经计算得到水箱有效容积为 1.92~14.4 m³, 根据地理位置和设计参数等条件, 确定分层水箱容积为 3.6 m³。

2.2.2 地源热泵系统的设计

研究对象为北京市某民用节能建筑, 根据地面面积、经济成本等因素确定地埋管换热器埋管方式为串联单 U 型垂直地埋管。

a. 地埋管换热器的长度计算^[18]。

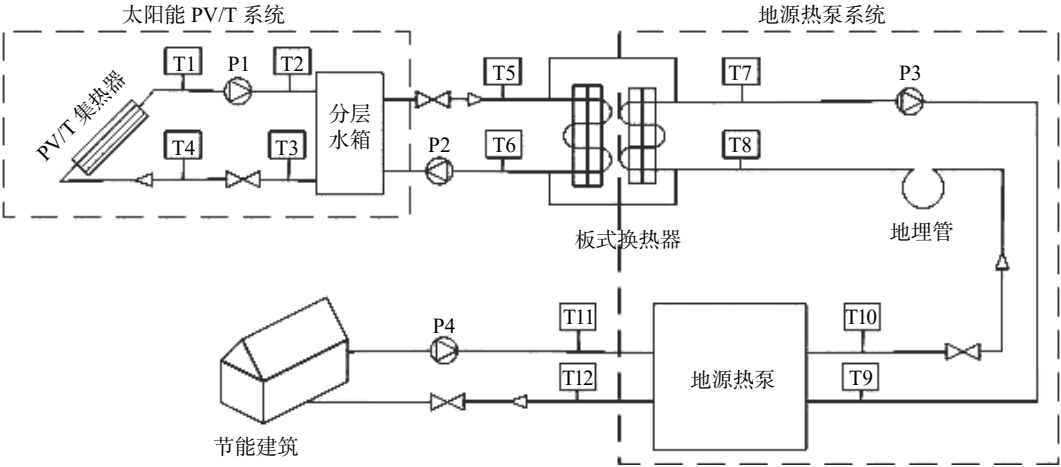


图 2 PV/T-GSHP 联合供暖系统原理图

Fig.2 Schematic diagram of the combined PV/T-GSHP heating system

$$L_h = \frac{1\,000q_h [R_f + R_{tr} + R_b + R_e F_h + R_{ap} (1 - F_h)]}{T_\infty - T_{min}} \cdot \frac{COP - 1}{COP} \quad (3)$$

式中： COP 为系统的性能系数； L_h 为供热工况下地埋管换热器总长度； q_h 为地源热泵的额定制热量； R_f 为循环介质与垂直地埋管换热器内壁的对流换热热阻； R_{tr} 为垂直地埋管换热器管壁热阻； R_b 为回填材料导热热阻； R_e 为地层热阻； R_{ap} 为短暂的连续脉冲负荷所形成的附加热阻； F_h 为供热运行份额； T_∞ 为垂直地埋管换热器附近土壤的初始温度； T_{min} 为垂直地埋管换热器中循环介质的平均温度。

b. 板式换热器的换热面积计算^[18]。

$$A_{he} = \frac{C_{rs} Q_{c,max}}{C_\varepsilon K_{he} \Delta T_h} \quad (4)$$

式中： A_{he} 为板式换热器换热面积； C_{rs} 为分层水箱到换热器的热损失系数； $Q_{c,max}$ 为太阳能集热器最大集热量； C_ε 为换热器结垢影响系数； K_{he} 为换热器传热系数； ΔT_h 为传热温差。

经计算得到板式换热器的换热面积为 4.78 m^2 。
TRNSYS 软件中地埋管换热器模块的输入端参数包括：气象条件、土壤物性参数及管材的导热系数等，经过相关部件的选型计算，具体参数如表 3 所示。

为了保证 PV/T-GSHP 系统在供暖季的长期运行效果，在 TRNSYS 平台上搭建了系统仿真模型（图 3）进行逐时动态模拟。

2.3 系统的温控策略

为了发挥 PV/T-GSHP 系统的节能潜力，提高

表 3 TRNSYS 输入端参数
Tab.3 Input parameters of TRNSYS

类型	参数	数值
北京市气象参数	供暖季日平均温度/℃	-4.2
	供暖季日最高温度/℃	15.08
	供暖季日最低温度/℃	-14.95
土壤物性参数	土壤初始温度/℃	14.2
	平均比热容/(kJ·m ⁻³ ·K ⁻¹)	2 016
	平均导热系数/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	2.0
	平均密度/(kg·m ⁻³)	1 975
地埋管参数	地埋管导热系数/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	0.46
	地埋管深度/m	80
	地埋管钻孔数量/个	5
	循环介质(20%乙二醇)导热系数/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	0.468

太阳能利用率，结合当地气象参数和系统设备性能指标，制定了相应的温控策略，对 PV/T-GSHP 系统进行联合控制。

太阳能集热循环运行控制逻辑如下：当集热器出口介质平均温度 T_1 与进口平均温度 T_4 的温差高于 $8\text{ }^\circ\text{C}$ 时，水泵 P1 开始工作；当此温差小于 $2\text{ }^\circ\text{C}$ 时，水泵 P1 停止工作^[19]。

地源热泵制热循环运行控制逻辑如下：当节能建筑功能区温度达到设计温度 $18\text{ }^\circ\text{C}$ 时，水泵 P3，P4 停止工作；若不满足设计温度，则水泵 P3，P4 同时开启。

整个系统的温控策略模式流程如图 4 所示，运行控制模式如表 4 所示。

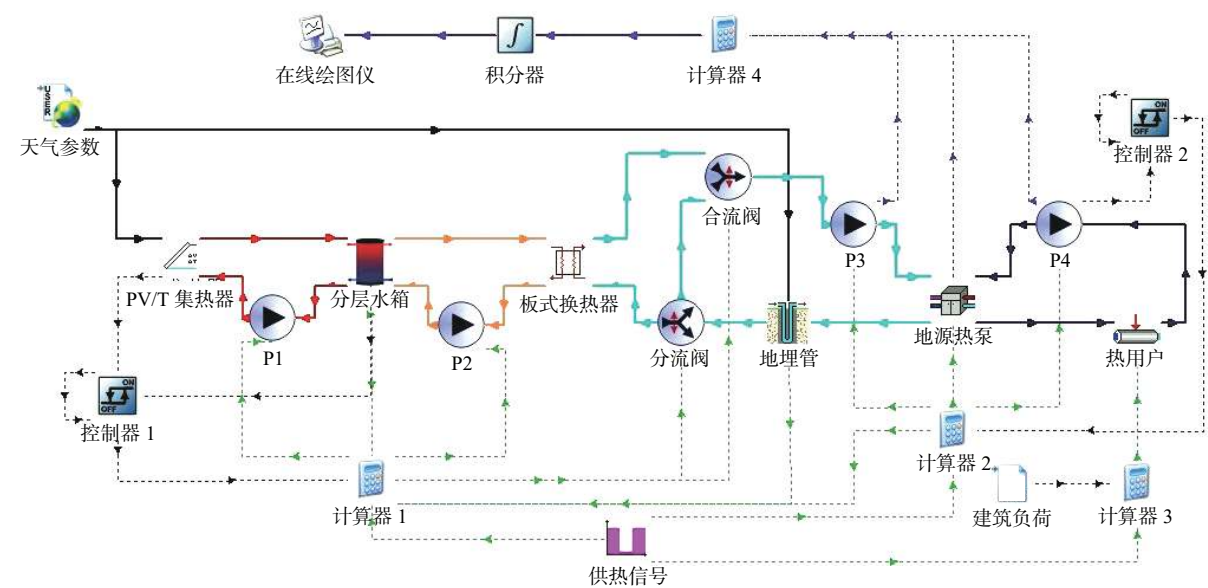


图 3 TRNSYS 动态系统性能分析模型

Fig.3 Analysis model for the system dynamic performance by using TRNSYS

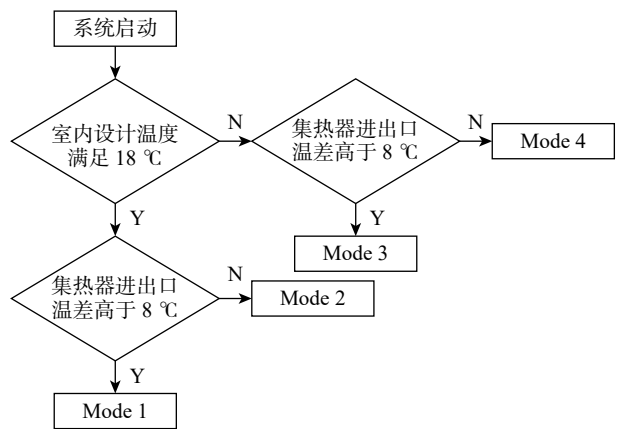


图 4 PV/T-GSHP 系统温控策略流程图

Fig. 4 Flow chart of the temperature control strategy of the PV/T-GSHP system

表 4 PV/T-GSHP 系统运行模式

Tab.4 Operation mode of the PV/T-GSHP system

模式	地源热泵系统	太阳能PV/T系统	运行模式
Mode 1	停止	启动	太阳能集热循环
Mode 2	停止	停止	停止
Mode 3	启动	启动	热泵联合供暖
Mode 4	启动	停止	地源热泵循环

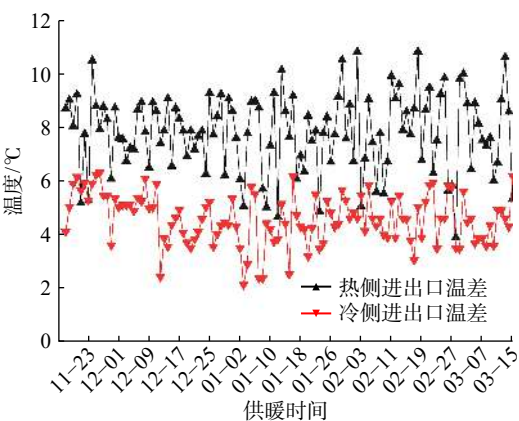


图 5 分层水箱进出口温差

Fig. 5 Inlet and outlet temperature differences of the stratification water tank

温差的变化趋势基本保持一致,表明集热器吸收的热量通过分层水箱能够将热量及时传递到板式换热器中。从图 5 可知,分层水箱热侧和冷侧平均温差分别为 7.6 °C 和 4.5 °C。这是由于在太阳能集热循环中,循环介质通过 PV/T 集热器吸收的热量在分层水箱进行放热,致使分层水箱热侧进出口温差大。同时,由于系统在板式换热器中的循环介质先通过地埋管预热,使热泵源侧循环介质温度提高,与分层水箱冷侧的循环介质温差减小,换热能力下降,导致分层水箱冷侧进出口温差减小。

3.2 光伏板发电量与温度

系统在 Mode 3 模式运行下的光伏板发电量和温度变化曲线如图 6 所示。由图 6 可知,在供暖季光伏板的平均温度为 30.3 °C,平均发电量为 4.8 kW。在 2019-01-09 光伏板发电量最小为 0.2 kW,主要原

3 结果分析

3.1 分层水箱进出口温差

图 5 为系统在 Mode 3 模式下运行的分层水箱热侧进出口和冷侧进出口温差变化曲线。从图 5 可知,热侧进出口温差的变化趋势与冷侧进出口

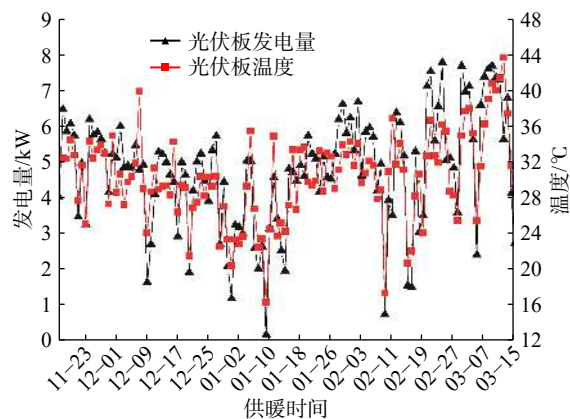


图6 光伏板发电量和温度

Fig. 6 Output power and temperature of the PV panel

因是当日太阳辐射强度较低。而在2019-03-12, 系统的光伏板温度最高, 光伏板温度过高将导致光电转换效率降低, 所以, 当日的光伏板发电量下降。同时, 与供暖初期和中期相比, 供暖末期的光伏板发电量更大, 原因在于虽然供暖季末期太阳辐射强度较大, 光伏板整体平均温度较高但处于最佳工作温度范围之内^[17], 光电转换效率仍然较高。

3.3 光电光热转换效率

系统在 Mode 3 模式下运行的光电光热转换效率如图 7 所示。由图 7 可知, PV/T 系统的光电转换效率平均值为 15.0%。在整个供暖季, PV/T-GSHP 系统的分层水箱热侧出口循环介质温度较高, 虽然与光伏板的温差小, 冷却能力下降, 但光伏板被冷却后的温度仍位于最佳工作温度范围之内^[20], 所以, PV/T 系统仍然具有相对较高的光电转换效率。PV/T 系统的光热转换效率平均值为 46.6%。在 PV/T-GSHP 系统中, 流入板式换热器的热泵源侧循环介质温度较低, 使得 PV/T-GSHP 系统热泵源侧循环介质与分层水箱冷侧循环介质温差变大, 换热

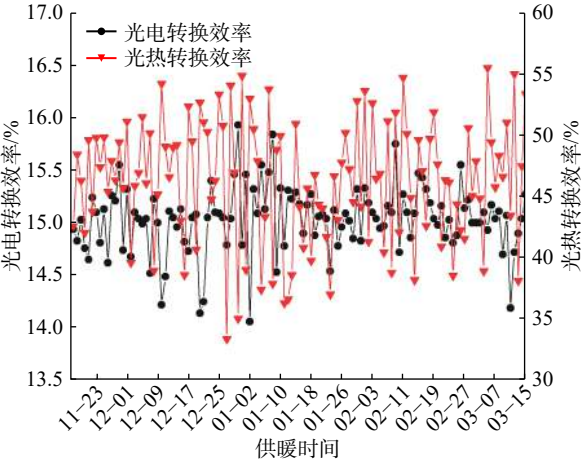


图7 光电光热转换效率

Fig. 7 Photoelectric and photothermal conversion efficiencies

量增加, 加大了分层水箱初始温度与换热后温度的温差, 相应地提高了 PV/T 系统的光热转化效率。

3.4 系统性能评价

系统的性能系数 COP 为热泵制热量与热泵耗电量的比值, 是用来评价热泵系统性能的参数; 系统的整体性能系数 $COPS$ 为热泵制热量与热泵和水泵消耗总电量的比值, 是用来评价热泵系统整体性能的参数。

图 8 和图 9 分别为系统在 Mode 3 和 Mode 4 模式下运行的 COP 和 $COPS$ 对比图。从图 8 可知, 在供暖季运行期间, GSHP 系统的 COP 平均值仅为 4.05, 而 PV/T-GSHP 系统的 COP 则为 4.33, 与 GSHP 系统相比提升了 6.9%。从图 9 可知, PV/T-GSHP 系统和 GSHP 系统的 $COPS$ 平均值分别为 3.86 和 3.5, 两者相差 10.3%。这表明 PV/T-GSHP 系统引入太阳能光伏光热联合作用, 不仅实现了 PV/T 系统的热电输出, 而且流入热泵源侧的循环介质具

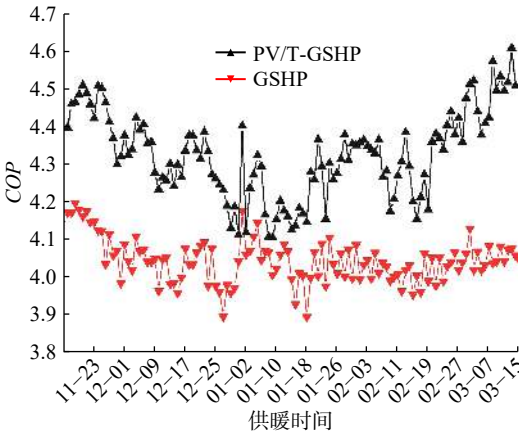


图8 PV/T-GSHP 与 GSHP 系统的 COP 对比图

Fig. 8 Comparison of COP between PV/T-GSHP and GSHP systems

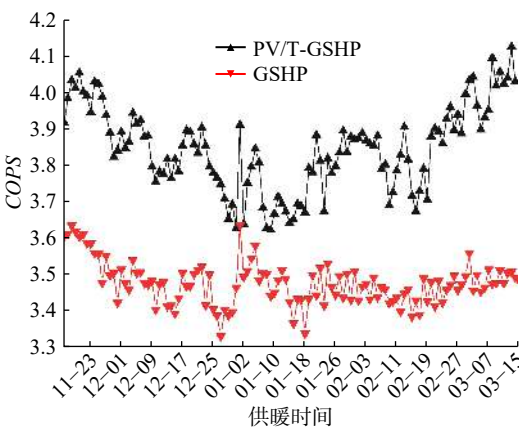


图9 PV/T-GSHP 与 GSHP 系统的 COPS 对比图

Fig. 9 Comparison of $COPS$ between PV/T-GSHP and GSHP systems

有更高的温度, 从而大幅度地减少了热泵消耗的电能, 使得 PV/T-GSHP 系统具有更优越的供热性能。

3.5 土壤温度变化

图 10 为 PV/T-GSHP 和 GSHP 这 2 个系统运行 10 a 地埋管周围土壤温度变化对比曲线, 土壤初始温度为 14.2 °C。从模拟结果可知, 地埋管周围土壤温度呈逐年下降趋势。经过 10 a 运行, PV/T-GSHP 系统土壤温度为 13.1 °C, 整体降低 8.0%, 而 GSHP 系统土壤温度为 11.0 °C, 降低幅度为 22.3%。PV/T-GSHP 系统的土壤下降速度远低于 GSHP 系统, 其原因在于 PV/T-GSHP 系统中太阳能的输入使得热泵源侧的循环介质减小了与土壤的换热量。

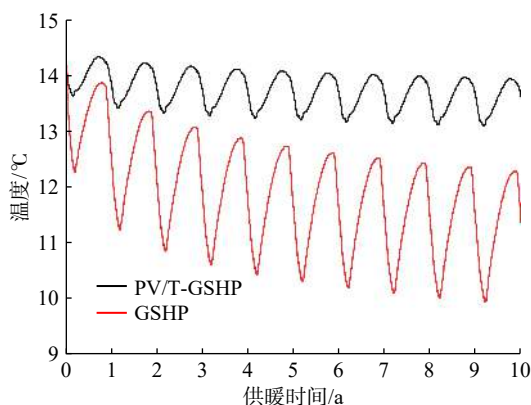


图 10 PV/T-GSHP 与 GSHP 系统 10 a 内土壤温度对比

Fig.10 Comparison between the soil temperature in 10 years by using PV/T-GSHP and GSHP systems

4 结 论

针对北京市某民用节能建筑设计了一套太阳能光伏光热辅助地源热泵 (PV/T-GSHP) 联合供暖系统。为了提高系统的整体供热性能, 作者结合当地气象参数和设备性能指标对系统运行制定了温控策略, 提高了太阳能的利用率。利用 TRNSYS 软件对 PV/T-GSHP 系统和 GSHP 系统在供暖季运行进行了模拟分析。整个供暖季, PV/T 系统的光电和光热平均转换效率分别达到 15.0%, 46.6%, PV/T-GSHP 系统的 COP 和 $COPS$ 相比 GSHP 系统分别提升了 6.9% 和 10.3%。PV/T-GSHP 系统的土壤温度降幅远小于 GSHP 系统。

参考文献:

[1] 李兆坚, 江亿. 我国广义建筑能耗状况的分析与思考 [J]. 建筑学报, 2006(7): 30–33.
[2] MA M D, CAI W G, WU Y. China act on the energy efficiency of civil buildings (2008): a decade review[J].

Science of the Total Environment, 2019, 651(1): 42–60.

[3] GEORGIEV A, POPOV R, TOSHKOV E. Investigation of a hybrid system with ground source heat pump and solar collectors: charging of thermal storages and space heating[J]. Renewable Energy, 2020, 147(2): 2774–2790.
[4] 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.
[5] FINE J P, NGUYEN H V, FRIEDMAN J, et al. A simplified ground thermal response model for analyzing solar-assisted ground source heat pump systems[J]. Energy Conversion and Management, 2018, 165: 276–290.
[6] 陆游. 基于 TRNSYS 的太阳能-地源热泵系统模型研究 [D]. 天津: 河北工业大学, 2015.
[7] 刘逸, 李炳熙, 付忠斌, 等. 严寒地区太阳能-土壤源热泵运行经济性分析 [J]. 热能动力工程, 2011, 26(4): 471–474.
[8] KLEIN S, BECKMAN W, MITCHELL J, et al. TRNSYS 16—a transient system simulation program, user manual[M]. Madison: University of Wisconsin-Madison, 2004.
[9] KJELLSSONE, HELLSTRÖM G, PERERS B. Optimization of systems with the combination of ground-source heat pump and solar collectors in dwellings[J]. Energy, 2010, 35(6): 2667–2673.
[10] RAD F M, FUNG A S, LEONG W H. Feasibility of combined solar thermal and ground source heat pump systems in cold climate, Canada[J]. Energy and Buildings, 2013, 61: 224–232.
[11] 郝红, 李媛, 冯国会, 等. 严寒地区太阳能-地源热泵与热网互补供暖的部件匹配性 [J]. 暖通空调, 2015, 45(4): 58–63.
[12] CALISE F, D'ACCADIA M D, FIGAJ R D, et al. Thermoeconomic optimization of a solar-assisted heat pump based on transient simulations and computer design of experiments[J]. Energy Conversion and Management, 2016, 125: 166–184.
[13] 邹晓锐, 周晋, 邓星勇, 等. 太阳能-地源热泵耦合式热水系统优化匹配研究 [J]. 太阳能学报, 2017, 38(5): 1281–1290.
[14] 季永明, 端木琳. 太阳能辅助地埋管地源热泵复合系统过渡季运行模式 [J]. 暖通空调, 2017, 47(10): 127–131.
[15] 王恩宇, 贺芳, 齐承英. 太阳能-地源热泵联合供暖系统运行策略研究 [J]. 暖通空调, 2012, 42(12): 83–87.
[16] 中国建筑科学研究院有限公司. JGJ 26—2010 严寒和寒冷地区居住建筑节能设计标准 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
[17] 中国建筑科学研究院有限公司. GB 50495—2019 太阳能供热采暖工程技术标准 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
[18] 中国建筑科学研究院有限公司. GB 50366—2009 地源热泵系统工程技术规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
[19] 郑瑞澄. 民用建筑太阳能热水系统工程技术手册 [M]. 2 版. 北京: 化学工业出版社, 2011.
[20] 高凯, 殷兴辉. 多路太阳能电池板温度监测系统 [J]. 国外电子测量技术, 2017, 36(4): 87–90.