

太阳能 PV/T 集热器耦合土壤源热泵复合系统运行特性

张长兴¹, 徐航¹, 鲁佳辉¹, 刘玉峰¹, 彭冬根²

(1. 山东科技大学 山东省土木工程防灾减灾重点实验室, 青岛 266590; 2. 南昌大学建筑工程学院, 南昌 330031)

摘要: 太阳能 PV/T 集热器耦合土壤源热泵复合系统 (Photovoltaic/Thermal Collector-Ground-Coupled Heat Pump systems, PV/T-GCHPs) 是一种可实现太阳能和浅层地热能互补利用的供能系统。为研究互补利用供能模式, 该研究通过建立 PV/T-GCHPs 数学模型, 在模拟研究系统运行特性的基础上, 与对应的光伏 (Photovoltaic, PV) 系统、土壤源热泵系统 (Ground-Coupled Heat Pump systems, GCHPs) 的性能进行了对比分析。结果表明, PV/T-GCHPs 中由于地埋管换热器 (Borehole Heat Exchanger, BHE) 的冷却作用, 光伏电池板表面温度降低而显著提高了其光伏效率, 相对于 PV 系统运行 20 a 的总发电量增加了 20 322 kW·h; 对应于相同的建筑负荷, PV/T-GCHPs 在降低 BHE 初投资的同时, 系统 20 a 的性能系数平均值较 GCHPs 提高了 32.23%。在系统的全寿命周期内, PV/T-GCHPs 的全寿命周期成本较对应的 GCHPs 节省了 77 192.45 元, 具有显著的经济效益。PV/T-GCHPs 增强了地热能和太阳能的互补优势, 研究结果为该系统在中国严寒和寒冷地区的推广应用奠定了理论基础。

关键词: COP; 光伏效率; PV/T-GCHPs; 地埋管换热器

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.12.025

中图分类号: TP273, TU111, TK52

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2021)-12-0215-08

张长兴, 徐航, 鲁佳辉, 等. 太阳能 PV/T 集热器耦合土壤源热泵复合系统运行特性[J]. 农业工程学报, 2021, 37(12): 215-222. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.12.025 <http://www.tcsae.org>

Zhang Changxing, Xu Hang, Lu Jiahui, et al. Operation characteristics of the composite system for combing solar PV/T collector and ground-coupled heat pump[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(12): 215-222. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.12.025 <http://www.tcsae.org>

0 引言

传统化石燃料的消耗和日趋严重的环境问题增强了人们对太阳能和地热能等可再生能源的关注。光伏 (Photovoltaic, PV) 系统收集太阳能转化成电能, 其运行性能在很大程度上受到环境温度和太阳辐射的影响^[1]。当光伏电池板的温度为 25 ℃ 时, 温度每升高 1 ℃, 会导致晶体硅光伏电池的光伏发电效率降低 0.45%^[2]。光伏/光热 (Photovoltaic/Thermal, PV/T) 系统是一种结合了光伏和光热的混合能源转换技术, 系统吸收太阳能, 同时产生电能和热量, 通过工作流体冷却光伏电池板, 在提高产电效率的同时, 可实现太阳能热能的有效利用^[3]。PV/T 系统是一种具有前景的新型太阳能系统, 可为建筑提供电和热, 较 PV 系统可以有效缩短投资周期^[4]。

土壤源热泵系统 (Ground-Coupled Heat Pump systems, GCHPs) 以土壤为冷/热源, 由于土壤温度全年波动小, 且相对于大气温度的滞后性, 使其性能系数 (Coefficient of Performance, COP) 较传统空气源热泵系统高。中国 GCHPs 的应用研究虽然起步比较晚, 但发展速度快, 且技术应用日臻成熟^[5-6]。在中国北方严寒和寒冷气候区, 建筑物空调冷、热负荷不均衡, 致使土壤出

现冷堆积的现象, 影响 GCHPs 的长期可靠运行^[7-9]。GCHPs 通过耦合 PV/T 集热器, 地埋管换热器 (Borehole Heat Exchanger, BHE) 作为 PV/T 集热器的冷却装置, 在提高 PV/T 集热器产电效率的同时, 实现地埋管换热器的补热, 缓解土壤的冷堆积, 增强太阳能和地热能的互补优势, 确保了太阳能 PV/T 集热器耦合土壤源热泵复合系统 (Photovoltaic/Thermal Collector-Ground-coupled Heat Pump systems, PV/T-GCHPs) 的长期稳定运行^[10-11]。

近年来, 学者们对 PV/T-GCHPs 进行了深入的研究^[12-17]。Entchev 等将 PV/T-GCHPs 与利用锅炉和冷水机组的传统系统进行了能耗比较, PV/T-GCHPs 节能率达到了 58%^[18]。徐鹏等提出一种新型太阳能光伏—热泵复合建筑供能系统, 并对 PV/T 系统与双热源热泵联合运行模式进行了试验研究与性能分析, PV/T 集热器全天平均集热效率为 22.3%, PV/T 系统全天平均综合效率为 34%, 实现了太阳能的高效利用^[19]。Abu-Rumman 等提出一种 PV/T-GCHPs 模型, 以解决约旦供热建筑电力短缺和电力消耗高的问题, 其利用 TRNSYS 软件的模拟结果表明, 该复合系统可使光伏电池板温度降低 20 ℃ 以上, 发电效率提高 9.5%^[20]。Nelson 等提出一种 PV/T-GCHPs 模型, 全寿命周期 (20 a) 的模拟结果表明, PV/T-GCHPs 较相同建筑负荷对应的 GCHPs 系统 BHE 总长度减少了 18%^[21]。

中国太阳能资源丰富, 全年日照时数大于 2 000 h 的地区, 约占全国总面积的 2/3 以上, 北方严寒和寒冷地区, 室外温度较低, 供暖期长, 日照良好。PV/T-GCHPs 能够强化太阳能 PV/T 集热器与 BHE 的协同优势, 在利用 BHE 冷却集热器的同时, 实现对土壤的补热。目前学者们针对

收稿日期: 2021-03-30 修订日期: 2021-05-28

基金项目: 山东省自然科学基金面上项目 (ZR2020ME187); 山东省高等学校科技计划项目 (J16LG06); 山东科技大学科研创新团队支持计划项目 (2015KYTD104)

作者简介: 张长兴, 博士, 副教授, 研究方向为可再生能源利用。

Email: zcx952@163.com

PV/T-GCHPs 应用特性的研究, 主要集中于分析系统组件 PV/T 集热器和土壤源热泵的性能和效率, 研究结果严谨且具有指导性, 但对于 PV/T-GCHPs 在中国气候环境下的系统性能和综合节能率分析较少, 对于复合系统较 PV 系统、GCHPs 长期的综合节能优势需要结合其特性进行深入分析。本文以济南地区某 6 层员工公寓为供能对象, 结合建筑负荷特性, 研究其全寿命周期内 (20 a) 的动态性能, 通过与应用 PV 系统和 GCHPs 运行特性的比较, 定量分析了 PV/T-GCHPs 的节能优势和经济性, 验证了双热源互补功能的有效性。

1 典型建筑及负荷状况

1.1 建筑概况

本文选取济南市 1 栋建筑面积为 1 152 m² 的 6 层员工公寓为研究对象, 建筑的内热源和房间温度严格按照中国 2015 年修订的《公共建筑节能设计标准》(GB 50189—2005) 进行设置^[22]。该公寓建筑的室内末端为风机盘管加新风系统, 冬季房间设定的供暖温度为 20 ℃, 夏季房间设定的制冷温度为 26 ℃。供暖季为 11 月 16 日—下一年 3 月 15 日, 济南地处寒冷地区, 该公寓建筑 24 h 全天供暖; 供冷季为 6 月 16 日—9 月 15 日, 供冷季每天 0:00—8:00 和 18:00—24:00 开启制冷; 其他时间为过渡季。建筑内人员活动的时间设置为每天的 0:00—8:00 和 18:00—24:00。考虑到人员的作息制度, 供暖季建筑内无人员活动时, 供热系统低温运行; 有人员活动时系统满负荷工作。

1.2 建筑逐时负荷

本文采用 DeST 软件对该公寓全年的逐时负荷进行模拟计算, 图 1 为济南地区全年逐时干球温度和对应的逐时动态负荷图。如图 1a 所示, 制热期间最低气温为 -12.1 ℃; 制冷期间最高气温为 38.8 ℃。如图 1b 所示, 该公寓建筑最大热负荷为 63.16 kW, 出现在 1 月 14 日, 全年累积热负荷为 99 483.77 kW·h; 最大冷负荷为 51.50 kW, 出现在 6 月 20 日, 全年累积冷负荷为 29 648.85 kW·h, 建筑的累计热/冷负荷比为 3.56。

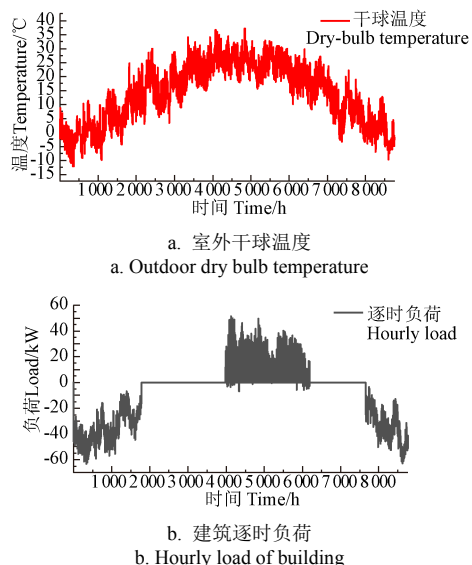


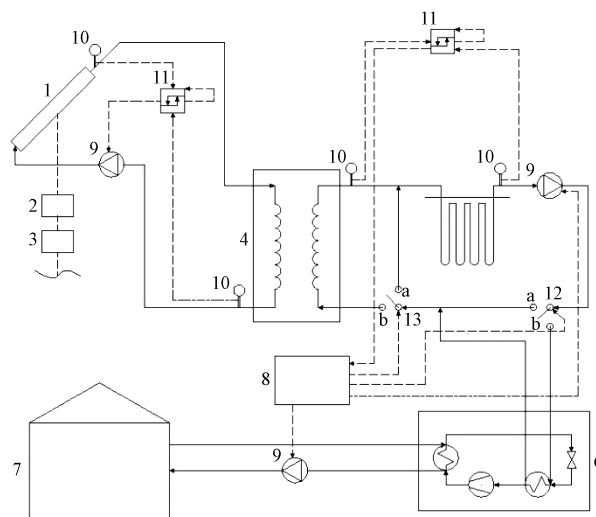
图 1 典型气象年室外干球温度与对应的建筑逐时负荷

Fig.1 Outdoor dry-bulb temperature in a typical weather year and hourly building load

2 PV/T-GCHPs 模型的建立

2.1 PV/T-GCHPs 系统的组成

PV/T-GCHPs 主要由 PV/T 系统、GCHPs 和控制系统组成, 如图 2 所示。PV/T 系统包括 PV/T 集热器、逆变器、蓄电池、循环水泵、储热水箱等, 管道内的循环工质为乙二醇防冻液; GCHPs 包括热泵、地埋管换热器、用户末端、源侧水泵、负荷侧水泵、第一电动三通阀、第二电动三通阀等, 源侧循环工质为乙二醇防冻液; 控制系统包括 PT100 温度传感器、温差控制器和总控制器。



1.PV/T 集热器 2.逆变器 3.蓄电池 4.储热水箱 5.地埋管换热器 6.热泵机组 7.用户末端 8.总控制器 9.水泵 10.PT100 温度传感器 11.温差控制器 12.第一电动三通阀(a/b 为切换点) 13.第二电动三通阀(a/b 为切换点)
1.PV/T collector 2.Inverter 3.Storage battery 4.Heat storage tank 5.Borehole heat exchanger(BHE) 6.Heat pump machine 7.User 8.Total controller 9.Water pump 10.PT100 temperature sensor 11.Temperature difference controller 12.First electric three-way valve(a/b is switch point) 13.Second electric three-way valve(a/b is switch point)

图 2 PV/T 集热器耦合土壤源热泵复合系统原理图

Fig.2 Schematic diagram of Photovoltaic/Thermal collector Ground-Coupled Heat Pump systems (PV/T-GCHPs)

2.2 系统各组件模型

1) PV/T 模型

PV/T 集热器的结构如图 3 所示。PV/T 集热器通过表面的光伏电池板发电, 利用位于吸收板下流道管降温, 保证光伏电池板在稳定低温下高效发电。

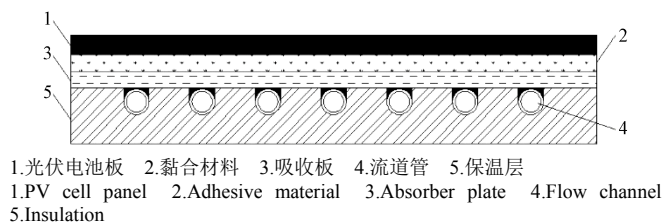


图 3 PV/T 集热器的结构图

Fig.3 Diagram of PV/T collector

Pang 等^[23]基于异质结电池, 分别测试了有无玻璃盖板的 PV/T 系统, 结果表明, 无玻璃盖板 PV/T 系统的光伏效率为 12.19%, 高于有玻璃盖板 PV/T 系统的 11.68%。为了取得更高的光伏效率, 本文系统模型选取无玻璃盖板 PV/T 集热器模型 Type560。根据文献^[24], 光伏组件

布置在建筑屋面时，应保障屋面排水通畅，且单个光伏方阵面积不宜大于 50 m²，最小边不宜大于 3 m。该员工建筑南侧屋面可供安装光伏组件的区域为 16 m×4 m，据此确定集热器长为 16 m，宽为 3 m，总面积为 48 m²。PV/T 集热器模块的主要参数设置如表 1 所示。

表 1 PV/T 集热器的主要参数
Table 1 Main parameters of the PV/T collector

项目 Item	数值 Value
集热器的面积 The area of thermal collector/m ²	48
吸收板厚度 Thickness of absorber plate/m	0.005
额定光伏效率 Rated PV efficiency/%	18
光伏效率温度系数 Temperature coefficient of photovoltaic efficiency/(%·(°C ⁻¹))	-0.5
流道管直径和间距 Flow tubes diameter and spacing/m	0.01/0.1
集热器的倾角 Angle of thermal collector/(°)	46
基准温度 Reference temperature/°C	25

PV/T 模型中光伏效率与光伏电池板温度、入射太阳辐射线性相关。忽略沿光伏电池板表面的能量传导，建立光伏板表面任意一点的能量平衡关系，表达式为

$$S - h_{\text{out}}(T_{\text{pv}} - T_{\text{amb}}) - h_{\text{rad}}(T_{\text{pv}} - T_{\text{sky}}) - \frac{(T_{\text{pv}} - T_{\text{abs}})}{R_{\text{T}}} = 0 \quad (1)$$

式中 S 为净吸收太阳辐射量（总吸收太阳辐射量-用于光伏发电量），W/m²； h_{out} 为从光伏电池板表面与环境的对流换热系数，取为 13.3 W/(m²·°C)； h_{rad} 为光伏电池板表面到天空的辐射换热系数，W/(m²·°C)； T_{pv} 为光伏电池板的温度，°C； T_{amb} 为环境温度，°C； T_{sky} 为用于长波辐射计算的天空温度，°C； T_{abs} 为吸收板的温度，°C； R_{T} 为光伏电池板和吸收板之间的材料热阻，取 0.036 (m²·°C)/W。

式（1）中净吸收太阳辐射量 S ，在 PV/T 模型中定义为

$$S = (\tau\alpha)_{\text{n}} \cdot \text{IAM} \cdot G_{\text{T}} (1 - \eta_{\text{pv}}) \quad (2)$$

式中 $(\tau\alpha)_{\text{n}}$ 为在法向入射下直射的有效透射吸收积，取为 0.85；IAM 为入射角修正系数，取为 0.1； G_{T} 为太阳辐射总量，W/m²； η_{pv} 为光伏效率，%。

式（1）中光伏电池板表面到天空的辐射换热系数 h_{rad} ，在 PV/T 模型中定义为

$$h_{\text{rad}} = \varepsilon\sigma(T_{\text{pv}} + T_{\text{sky}})(T_{\text{pv}}^2 + T_{\text{sky}}^2) \quad (3)$$

式中 ε 为光伏电池板的表面辐射系数，取为 0.9； σ 为斯蒂芬—玻尔兹曼常数，取为 5.67×10⁻⁸ W/(m²·°C⁴)

光伏效率与光伏电池板的温度相关，在 PV/T 模型中定义为

$$\eta_{\text{pv}} = \eta[1 - \beta(T_{\text{pv}} - T_{\text{ref}})] \quad (4)$$

式中 η 为光伏组件在标准测试条件（Standard Test Conditions, STC）下的光伏效率； β 为光伏效率的温度系数； T_{ref} 为 STC 下的基准温度（25 °C）。太阳能光伏组件的 STC 被“欧洲委员会”定义为 101 号标准，其中电池温度为 25 °C，光谱为 AM1.5，光谱辐照度为 1 000 W/m²。

2) DST 模型

本文选用 DST（Dust Storage system, DST）模型对地埋管换热器进行模拟计算。DST 模型由 Hellstorm 提出，适用于竖直地埋管换热器钻孔群的计算研究^[25]。DST 模型是关于中心对称竖直的有限长柱热源模型，假定钻孔在蓄热体中均匀布置，钻孔内为对流换热，钻孔外与土壤之间为导热，钻孔周围的土壤的温度由三部分表示，总体换热温度、局部换热温度、稳定流动温度。土壤内部某一点的温度可以由以上三部分叠加求解得到。DST 模型中蓄热体的体积定义为

$$V = \pi NH(0.525B)^2 \quad (5)$$

式中 V 为蓄热体的体积，m³； N 为钻孔数量，个； H 为钻孔深度，m； B 为孔间距，m。

根据济南典型气象年的小时逐时气象资料，确定济南的年平均气温为 13.8 °C，土壤表面的初始温度为 15 °C。参照参考文献[26]，确定土壤的导热系数为 1.53 W/(m·°C)，热容量为 2 000 kJ/(m³·°C)。根据 2009 年修订的《地源热泵系统工程技术规范》（GB50366—2005）要求，确定单个钻孔的深度、钻孔的孔径和孔间距、埋管的形式为双 U 形等^[27]。土壤的热物性参数和地埋管的具体参数设置如表 2 所示。

表 2 地埋管换热器模型的计算参数
Table 2 Calculated parameters of the BHEs

项目 Item	数值 Value
钻孔的深度 Depth of borehole/m	100
钻孔的孔间距 Spacing of borehole/m	4.8
钻孔的直径 Borehole diameter/m	0.15
U 型管的内径/外径 Inner and outer diameter of U-shaped pipe/m	0.026/0.032
土壤初始平均温度 Initial average ground temperature/°C	15
土壤的导热系数 Ground thermal conductivity /(W·(m·°C) ⁻¹)	1.53
回填材料导热系数 Thermal conductivity of backfill materials/(W·(m·°C) ⁻¹)	2.6
U 型管的导热系数 Thermal conductivity of U-shaped pipe/(W·(m·°C) ⁻¹)	0.4

3) 热泵模型

热泵机组是 PV/T-GCHPs 中的重要组件，其运行特性影响系统的性能和运行能耗。本文选用文献[28]建立的水—水热泵机组模型，该模型在建立机组的半经验公式的基础上，结合机组实际运行的样本数据进行回归分析，求解半经验公式中的各项系数，最终得到热泵机组的数学模型。机组的额定制热量为 63.7 kW，额定制冷量为 53.6 kW，机组制热工况下额定性能系数为 5.4，制冷工况下的额定性能系数为 6.23。机组的制热、制冷工况的切换通过 0/1 控制，当控制信号为“0”时，机组按照制热工况运行，机组制热性能系数和源侧取热量的求解公式见式（6）；当控制信号为“1”时，机组按照制冷工况运行，机组制冷性能系数的和源侧放热量的求解公式见式（7）。

$$\begin{cases} \text{COP}_h = \frac{\text{CAP}_h}{P_h} \\ Q_{\text{gh}} = \text{CAP}_h - P_h \end{cases} \quad (6)$$

式中 COP_h 为机组的制热性能系数； CAP_h 为热泵实时制热量，kW； P_h 为热泵实时制热功率，kW； Q_{gh} 为机组源

侧实时取热量, kW。

$$\begin{cases} \text{COP}_c = \frac{\text{CAP}_c}{P_c} \\ Q_{gc} = \text{CAP}_c + P_c \end{cases} \quad (7)$$

式中 COP_c 为机组的制冷性能系数; CAP_c 为热泵实时制冷量, kW; P_c 为热泵实时制冷功率, kW; Q_{gc} 为机组源侧实时放热量, kW。

4) 水泵模型

PV/T-GCHPs 中的水泵模型, 包括循环水泵、源侧水泵、负荷侧水泵。水泵模型为定流量水泵, 水泵的启停通过 0/1 控制, 当控制信号为“1”时, 水泵按照设置好的参数稳定运行, 当控制信号为“0”时, 水泵停止运行。根据文献[27], 双 U 形埋管内推荐流速不宜小于 0.4 m/s, 因此孔内流速取 0.45 m/s, 对应源侧水泵流量为 13.76 m³/h, 源侧水泵扬程为 26 m, 根据建筑冬季设计热负荷, 确定负荷侧水泵的流量为 9.21 m³/h, 负荷侧水泵扬程为 32 m。

根据式 (8) 确定循环水泵的流量为 2.88 m³/h, 循环水泵的扬程为 5 m。

$$G_s = gA \quad (8)$$

式中 G_s 为太阳能集热系统的设计流量, m³/h; g 为太阳能集热器的单位面积设计流量, m³/(h·m²); A 为集热器的采光面积, m²。其中, g 根据《太阳能供热采暖工程技术规范》(GB 50495—2009) 选取 0.06 m³/(h·m²)^[29]。

2.3 系统的控制策略

PV/T-GCHPs 工作时, 太阳能集热泵冬季白天全天开启。PT100 温度传感器将收集到的温度信息传递给温差控制器, 温差控制器适于设定好的上下限温度生成信号传递给总控制器, 总控制器将信号结合时间进行控制处理, 输出处理后的信号控制电动三通阀的切换、水泵的开启和热泵的运行, 实现了 PV/T-GCHPs 在全年 3 种不同工作模式下的转换, 可以满足夏季的晚上供冷、冬季的全天供暖、光伏发电和太阳能土壤补能。该复合供能系统充分利用了太阳能和地热能, 实现了可再生能源的互补利用。

PV/T-GCHPs 的 3 种运行模式通过控制两个电动三通阀来实现切换。如图 2 所示, “a” 设置为三通阀换向口, “b” 设置为三通阀出口。当控制信号为“0”时, 工质经“b”流出阀门; 当控制信号为“1”时, 工质经“a”流出阀门。系统具体运行的模式和功能见表 3。

2.4 系统的合理性论证

本文利用 Trnsys 平台建立了 PV/T-GCHPs 系统模型, 主要的核心组件包括 PV/T 模型、水—水热泵机组模型、DST 计算模型。文献[1]基于 Trnsys 软件建立了一种太阳能光伏耦合地埋管换热器系统, 验证了 PV/T 模型可以用于模拟 PV/T 集热器光伏发电和光热在不同太阳辐射下的变化。文献[28]利用 DOE-2 模型和多元多项式回归模型开发的水—水热泵机组模型, 模型的预测值接近于样本值, 能够准确的反应各种工况下机组性能的变化规律。文献[1]通过热响应试验数据验证了 Trnsys 软件中 DST 计算模型的可靠性, 测试试验 10 h 后, 土壤平均温度模拟值和实测值的相对误差值为 0.9%, DST 模型的模拟工况

与实际运行工况一致, 可以用于 BHE 管群的实际换热模拟研究。综合各方研究结果, PV/T 模型、水—水热泵机组模型、DST 计算模型组件可靠性强, 本文建立的系统模型可用于预测 PV/T-GCHPs 系统的运行特性。

表 3 系统运行模式和功能
Table 3 System operation modes and function

运行模式 编号 Operational mode No.	时间 Time	第一/第二 三通阀控制信号 First/second electric three way valve control signal	系统功能 System function
1	供热季 (全天)	0/0	热泵为用户末端 供暖; 太阳能发 电; 太阳能产热 给土壤补能
2	过渡季 (全天); 供冷季 (8:00— 18:00)	1/0	太阳能发电; 太 阳能为土壤补热
3	供冷季 (0:00—8:00 18:00—24:00)	0/1	热泵为用户末端 供冷

3 地埋管换热器设计

地埋管换热器的设计过程中, 土壤源热泵源侧的进水温度是影响系统可靠性的重要因素。根据文献[30]制热时热泵源侧温度进水温度应该控制在 -5~25 ℃, 制冷时应该控制在 10~40 ℃。本系统为建筑热负荷占优的热泵系统, 且 BHE 内的循环工质为乙二醇防冻液, 故机组源侧进水温度的下限值 T_{\min} 设定为 4 ℃。采用先按经验值估算, 后进行系统模拟优化的方法来确定埋管总长度^[31]。GCHPs 的土壤初始温度、土壤热物性参数、U 型管和钻孔的参数与 PV/T-GCHPs 相同, 见表 2。图 4 为 20 a 内 PV/T-GCHPs 和 GCHPs 的机组源侧进水温度变化, 20 a 内热泵源侧的最低进水温度 T_{\min} = 4 ℃, 最终确定 PV/T-GCHPs 钻孔数量为 16 个, GCHPs 的钻孔数量为 22 个。可见, 应用 PV/T-GCHPs 较 GCHPs 对应的 BHE 总长度降低了 27.3%, 与文献[21]的研究结果一致, 验证了本文结果的可靠性。

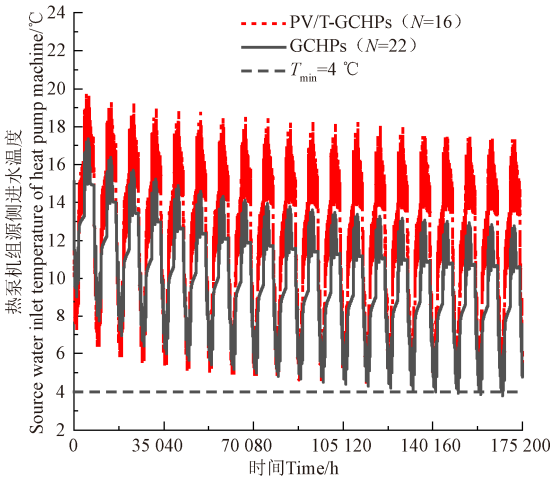


图 4 20 a 内两个系统热泵机组源侧进水温度的逐时变化
Fig.4 Hourly variation of the source water inlet temperature of heat pump machine corresponding to PV/T-GCHPs and GCHPs in 20 years

4 运行特性分析

本文对 PV/T-GCHPs 全寿命周期 (20 a) 的运行特性进行了模拟研究, 在计算系统发电量和 PV 系统对应值的基础上, 对比了 PV/T-GCHPs 和 PV 系统的光伏发电效率; 通过计算 PV/T-GCHPs 和 GCHPs 的 COP, 分析了 PV/T-GCHPs 的综合节能优势及其经济性。

4.1 PV/T-GCHPs 的光伏发电效率

1) 典型日光伏发电效率

本文选取第 1 年的 4 月 2 日为一个典型日, PV/T-GCHPs 处于工作模式 2, 图 5 为 0:00—24:00 时 PV 系统与 PV/T-GCHPs 光伏电池板表面温度和光伏效率的对比图。可以看出, 在 0:00—6:00 和 20:00—24:00 时段, 由于没有太阳辐射, PV 系统与 PV/T-GCHPs 的光伏效率为 0; 在 7:00—9:00 时段, 随着太阳辐射逐渐增强, PV 系统与 PV/T-GCHPs 光伏板的温度从初始的 3.47 °C 升高到 22.35 °C, 对应的光伏效率从初始的 17.76% 下降到 16.60%; 在 10:00—16:00 时段, 太阳辐射先增强后减弱, PV 系统光伏板的温度也呈相同趋势变化, 在 12:00 时达到峰值 46.79 °C, PV/T-GCHPs 对应的光伏效率先下降后上升, 在 12:00 时降至谷值 15.02%, PV/T-GCHPs 光伏板的温度在 22.72~26.64 °C 的范围内平稳变化, 系统 12:00 时的光伏板温度为 25.88 °C, 较同时刻的 PV 系统低 44.69%, 系统的光伏效率稳定在 16.56%~16.84% 的范围内, 12:00 时的光伏效率为 16.84%, 较同时刻的 PV 系统高 12.12%; 17:00—19:00 时段, PV 系统与 PV/T-GCHPs 光伏板的初始温度为 25.12 °C, 对应的光伏效率为 16.28%, 随着太阳辐射的逐渐减弱, 光伏板的温度降低到 11.65 °C, 由于光伏板温度的降低, 对应的光伏效率升高到 17.07%。在太阳辐射最强的 10:00—16:00 时段, 光伏电池板的温度高, 对应时段的 PV 系统由于没有液体的冷却降温导致光伏板的温度显著升高, 光伏效率明显降低, PV/T-GCHPs 通过耦合 BHE 管群, 实现对 PV/T 集热器的冷却, 降低了光伏板的温度, 有效提升了光伏效率。

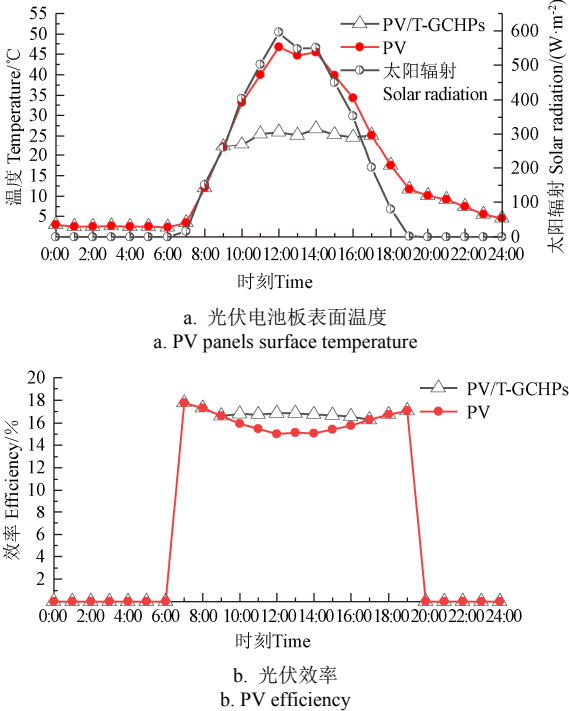


图 5 PV/T-GCHPs 和 PV 系统光伏板平均温度和光伏效率的比较
Fig.5 Comparison of average PV panels surface temperature and PV efficiency between PV/T-GCHPs and PV systems

2) 年光伏发电效率

通过模拟 PV/T-GCHPs 和 PV 系统运行特性得出, 在 PV/T-GCHPs 全寿命周期内, PV/T-GCHPs 运行 20 a 的总发电量为 186 748 kW·h, 较 PV 系统发电量增加 20 322 kW·h。第 1 年 PV 系统与 PV/T-GCHPs 月发电量和月平均光伏效率对比如表 4 所示。由表 4 可以看出, 随着太阳辐射量的增大, PV/T-GCHPs 和 PV 系统的月发电量逐步增加, 在 5 月均达到最大值, 该月 PV/T-GCHPs 月发电量较 PV 系统高 13.73%。太阳辐射量在 12 月降至全年最小值, 此时 PV/T-GCHPs 和 PV 系统的月发电量均降至最低值, 该月的 PV/T-GCHPs 月发电量较 PV 系统高 8.67%。

表 4 PV/T-GCHPs 和 PV 系统月发电量和月平均光伏效率的比较

Table 4 Comparison of PV/T-GCHPs and PV system monthly electricity yield and monthly average PV efficiency

月份 Month	太阳辐射总量 Solar radiation/kW·h	干球温度 Dry-bulb temperature/°C	PV/T-GCHPs		PV	
			月发电量 Monthly electricity yield/kW·h	月平均光伏效率 Monthly average PV efficiency/%	月发电量 Monthly electricity yield/kW·h	月平均光伏效率 Monthly average PV efficiency/%
1	4 677	-2	671	18.14	616	18.02
2	5 009	2	711	17.92	642	17.69
3	6 044	9	821	17.45	742	17.08
4	7 089	16	935	17.07	836	16.48
5	7 541	21	969	16.72	852	16.01
6	7 021	25	883	16.45	773	15.69
7	6 372	26	794	16.23	702	15.54
8	6 295	25	796	16.29	703	15.65
9	6 405	21	825	16.62	732	16.05
10	5 577	15	734	16.95	668	16.56
11	4 204	7	570	17.50	532	17.40
12	3 949	0	564	18.00	519	17.93

如表 4 所示, PV/T-GCHPs 和 PV 系统在 6~7 月份

的月平均光伏效率为 16.23%~16.45% 和 15.54%~

15.69%，文献[20]中该月份的 PV/T-GCHPs 和 PV 系统光伏效率范围分别为 18.3%~15.6%和 18%~14.1%，验证了本文研究结论的可靠性。

除了太阳辐射量，光伏发电与室外干球温度密切相关。全年干球温度先升高后降低，在 7 月达到最大值 26.1℃，PV/T-GCHPs 和 PV 系统的月平均光伏效率呈相反的趋势，且均降至最低值，该月 PV/T-GCHPs 的月平均光伏效率较 PV 系统高 4.47%。冬季（1 月—2 月、12 月）较低的室外温度可以更好的冷却光伏电池板，两种系统冬季各月的月平均光伏效率均高于其他月份。

4.2 PV/T-GCHPs 的土壤平均温度

为了对比分析 PV/T-GCHPs 与 GCHPs 的土壤温度变化，分别计算了 PV/T-GCHPs 和 PV 系统 20 a 的土壤平均温度，图 6 为 PV/T-GCHPs 与 GCHPs 土壤平均温度 T_{avg} 的对比图。可以看出，随着系统运行，PV/T-GCHPs 与 GCHPs 的 T_{avg} 呈现出相同的波动下降趋势，到第 20 年止 PV/T-GCHPs 的 T_{avg} 由初始的 15℃ 下降到 175 200 h 的 11.80℃，GCHPs 的对应值由 15℃ 下降到 9.3℃，PV/T-GCHPs 第 175 200 h 的 T_{avg} 较 GCHPs 升高 2.5℃。两个系统土壤温度年最小值的差值逐年加大，在第 20 年，温差达到 2.22℃。PV/T-GCHPs 通过结合 PV/T 集热器，集热器吸收太阳辐射后实现了太阳能对土壤的热量补充，土壤升温明显，在缓解了建筑冷热负荷不平衡导致的土壤温度下降的同时，较相同建筑负荷 GCHPs 对应的 BHE 总长度缩减了 600 m。

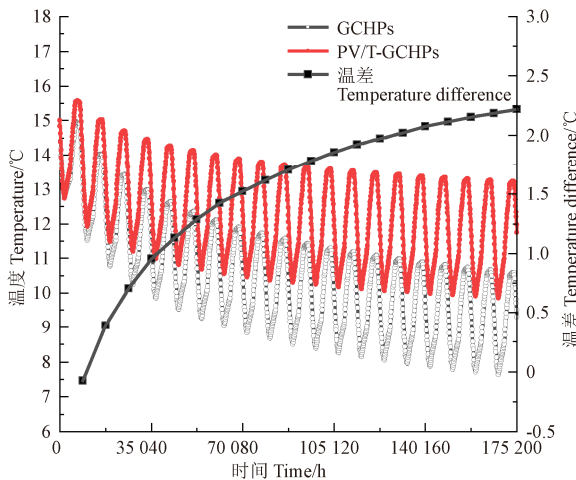


图 6 PV/T-GCHPs 和 GCHPs 的土壤平均温度比较

Fig.6 Comparison of the average ground temperature between PV/T-GCHPs and GCHPs

4.3 PV/T-GCHPs 的节能效益与经济效益

1) 节能效益

在综合考虑 PV/T-GCHPs 发电量的基础上，通过计算 PV/T-GCHPs 和 GCHPs 的逐年 COP 值，本文分析了 PV/T-GCHPs 相对于 GCHPs 的综合节能效益。结合 PV/T-GCHPs 的特点，两个系统的年 COP 采用下式计算

$$COP = \frac{Q}{W} \quad (9)$$

式中 COP 为系统的年性能系数； Q 为建筑的全年负荷需

求，kW·h；对于 GCHPs， W 为系统年运行能耗，kW·h；对于 PV/T-GCHPs， W 为系统年运行能耗减去系统年发电量，kW·h。

PV/T-GCHPs 和 GCHPs 的 20 a 的 COP 平均值 COP_{mean} 采用下式计算

$$COP_{mean} = \frac{20Q}{\sum_{i=1}^{20} W_i} \quad (10)$$

式中对于 GCHPs， W_i 为第 i 年的系统年运行能耗，kW·h；对于 PV/T-GCHPs， W_i 为第 i 年的系统年运行能耗减去系统年发电量，kW·h。

图 7 为两个系统在第 1 年和第 20 年的年 COP 对比图， COP_{1st} 为系统第 1 年的年 COP， COP_{20th} 为系统第 20 年的年 COP。可以看出，GCHPs 年 COP 由第 1 年的 3.92 增加到第 20 年的 3.95，系统的 COP_{mean} 为 3.94；PV/T-GCHPs 年 COP 由第 1 年的 5.20 增加到第 20 年的 5.22， COP_{mean} 为 5.21；PV/T-GCHPs 的 COP_{1st} 和 COP_{20th} 较 GCHPs 分别高 32.65%、32.15%，系统的 COP_{mean} 与 GCHPs 相比增大 32.23%。

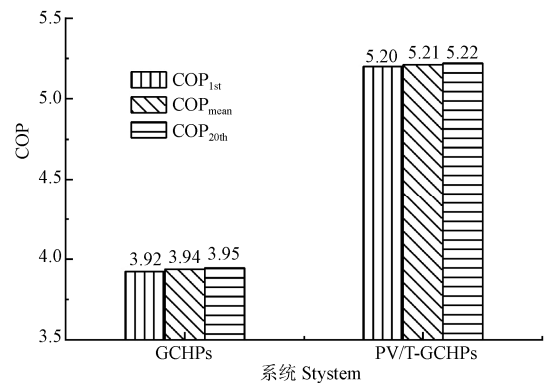


图 7 PV/T-GCHPs 和 GCHPs 的系统 COP (Coefficient of Performance) 比较

Fig.7 Comparison of system COP of PV/T-GCHPs and GCHPs

2) 经济效益

PV/T-GCHPs 与 GCHPs 的热泵选型相同，全寿命周期内 PV/T-GCHPs 相较于 GCHPs 增加的初投资为 48 m²PV/T 集热器、一个 4.8 m³ 的储热水箱、一台 3 m³/h 的水泵和一套控制设备，但相应减少了 6 个 BHE 的初投资。PV/T-GCHPs 较 GCHPs 增加的初投资为

$$I_{int} = I_{PV/T} + I_{tank} + I_{pump} + I_{cu} - 6H(I_{dill} + 4I_{pipe}) \quad (11)$$

式中 $I_{PV/T}$ 为集热器的费用，72 000 元； I_{tank} 为储热水箱的费用，3 840 元； I_{pump} 为水泵的费用，2 000 元； I_{cu} 为控制设备的费用，5 000 元； I_{dill} 为单米钻孔的钻孔费用，100 元/m； I_{pipe} 为地埋管选用的管材费用，5 元/m^[26]。

全寿命周期 20 a 内，PV/T-GCHPs 较 GCHPs 通过光伏发电减少的运行费用为

$$I_{oper} = M_{ele} [W_{pv} - (W_{re} - W_{hp})] \quad (12)$$

式中 M_{ele} 为电价，0.55 元/(kW·h)； W_{pv} 为 PV/T-GCHPs

运行 20 a 的总发电量, 为 186 748 kW·h; W_{bp} 为 GCHPs 运行 20 a 的总能耗, 653 493 kW·h; W_{re} 为 PV/T-GCHPs 运行 20 a 的总能耗, 680 182 kW·h。

根据式 (11) 和 (12), 全寿命周期内 PV/T-GCHPs 较 GCHPs 增加的初投资为 10 840 元, PV/T-GCHPs 较 GCHPs 减少的运行费用为 88 032.45 元。因此, 全寿命周期内 PV/T-GCHPs 较 GCHPs 节省的总费用为 77 192.45 元。

5 结 论

本文以济南某 6 层员工公寓楼为供能对象, 建立 PV/T-GCHPs 模型对其性能进行模拟研究, 并与 PV 系统和 GCHPs 进行了性能对比。得出以下结论:

1) PV/T-GCHPs 通过耦合 BHEs 管群, 有效冷却了光伏电池板, 典型日 (4 月 2 日) 12:00 时的光伏电池板温度较 PV 系统降低 44.69%, 对应的光伏效率比同时刻的 PV 系统高 12.12%;

2) PV/T-GCHPs 运行 20 a 的总发电量较 PV 系统增加 20 322 kW·h。在系统运行的第 1 年, PV/T-GCHPs 与 PV 系统相比, 月发电量的最大值提高 13.73%, 月发电量最小值增加 8.67%; 系统月平均光伏效率的最小值为 16.23%, 较 PV 系统高 4.47%;

3) PV/T-GCHPs 全寿命周期内 (20 a) 通过太阳能给土壤补能, 第 175 200 h 对应的 T_{avg} 较 GCHPs 升高 2.5 °C, 改善了建筑冷热负荷不平衡导致的土壤温度下降现象的同时, 较相同建筑负荷的 GCHPs 对应的 BHE 总长度缩减了 600 m。PV/T-GCHPs 全寿命周期内 (20 a) 的 COP_{mean} 为 5.21, 较 GCHPs 高 32.23%。PV/T-GCHPs 的全寿命周期成本较 GCHPs 低 77 192.45 元。

参 考 文 献

- [1] Yan Ruoping, Yu Xiaohui, Lu Fuwei, et al. Study of operation performance for a solar photovoltaic system assisted cooling by ground heat exchangers in arid climate, China[J]. Renewable Energy, 2020, 155: 102-110.
- [2] Skoplaki E, Palyvos J A. On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations[J]. Solar Energy, 2008, 83(5): 614-624.
- [3] Daisuke Sato, Noboru Yamada. Review of photovoltaic module cooling methods and performance evaluation of the radiative cooling method[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, 104: 151-166.
- [4] 王宝群, 姚强, 宋蕾, 等. 光伏/光热(PVT)系统概况与评价[J]. 太阳能学报, 2009, 30(2): 193-200.
Wang Baoqun, Yao Qiang, Song Qiang, et al. Photovoltaic-thermal (PVT) systems and their evaluation[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2009, 30(2): 193-200. (in Chinese with English abstract)
- [5] 张长兴, 郭占军, 刘玉峰, 等. 土壤源热泵系统运行特性的快速预测方法[J]. 农业工程学报, 2012, 28(24): 173-178.
Zhang Changxing, Guo Zhanjun, Liu Yufeng, et al. A fast forecast method for operation characteristics of ground-coupled heat pump system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(24): 173-178. (in Chinese with English abstract)
- [6] 刁乃仁, 方肇洪. 因地制宜推广地源热泵技术[N]. 中国科学报, 2020-08-12.
- [7] 姚灵锋, 蔡龙俊. 地源热泵热平衡问题的研究及工程应用[J]. 节能技术, 2009, 27(2): 140-144.
Yao Lingfeng, Cai Longjun. Study and application of thermal balance problem on ground-source heat pump[J]. Energy Conservation Technology, 2009, 27(2): 140-144. (in Chinese with English abstract)
- [8] 赵赫, 刘馨, 冯国会, 等. 严寒地区某绿色商业建筑土壤源热泵系统运行性能分析[J]. 建设科技, 2019(22): 56-61.
Zhao He, Liu Xin, Feng Guohui, et al. Operational performance analysis of ground source heat pump system of a green commercial building in severe cold region[J]. Construction Science and Technology, 2019(22): 56-61. (in Chinese with English abstract)
- [9] Sheikh K S, Lu A, Behzad R. Simulated performance of a borehole-coupled heat pump seasonal solar thermal storage system for space heating in cold climate[J]. Solar Energy, 2020, 202: 365-385.
- [10] Aldubyan M, Chiasson A. Thermal study of hybrid photovoltaic-thermal(PVT) solar collectors combined with borehole thermal energy storage systems[J]. Energy Procedia, 2017, 141: 102-108.
- [11] Erik B, Jens G, Gunter R. Unglazed PVT collectors as additional heat source in heat pump systems with borehole heat exchanger[J]. Energy Procedia, 2012, 30: 414-423.
- [12] 李洋, 王春明, 李建科. 独立建筑光伏-光热-土壤源热泵一体化系统设计[J]. 建筑电气, 2019, 38(1): 60-64.
Li Yang, Wang Chunming, Li Jianke. Design of integrated system of photovoltaic-photothermal geothermal heat pump for independent buildings[J]. Building Electricity, 2019, 38(1): 60-64. (in Chinese with English abstract)
- [13] 李洪, 王美芳, 张曼. 光伏-环路热管/热泵热水系统在不同气候区性能对比与优化[J]. 农业工程学报, 2020, 36(1): 252-256.
Li Hong, Wang Meifang, Zhang Man. Feasibility comparison and optimization on a loop-heat-pipe type PV/T heat pump water heating system in different climatic regions[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(1): 252-256. (in Chinese with English abstract)
- [14] 张龙灿. 光伏-太阳能环形热管/热泵复合系统的实验研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2014.
Zhang Longcan. Experimental Study of a Photovoltaic Solar-assisted Loop Heat Pipe/heat Pump System[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2014. (in Chinese with English abstract)
- [15] 王岗, 全贞花, 赵耀华, 等. 太阳能-热泵复合供能系统[J]. 化工学报, 2017, 68(5): 2132-2139.
Wang Gang, Quan Zhenhua, Zhao Yaohua, et al. Solar-heat pump combined energy system[J]. CIESC Journal, 2017, 68(5): 2132-2139. (in Chinese with English abstract)
- [16] 裴刚, 季杰, 何伟, 等. PV/T 太阳能热泵系统的性能研究[J]. 中国工程科学, 2006(9): 49-56.
Pei Gang, Ji Jie, He Wei, et al. Dynamic performance of PV/T solar-assisted heat pump system[J]. Strategic Study of CAE, 2006(9): 49-56. (in Chinese with English abstract)
- [17] Danny J, Manuel L, Danjana T, et al. Performance modeling of PVT collectors: Implementation, validation and parameter identification approach using TRNSYS[J]. Solar Energy, 2019, 193: 51-64.
- [18] Entchev E, Yang L, Ghorab M, et al. Performance analysis of a hybrid renewable microgeneration system in load sharing applications[J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 71(2): 697-704.
- [19] 徐鹏, 全贞花, 赵耀华, 等. 新型太阳能光伏-热泵复合建筑供能系统及其性能实验研究[J]. 建筑科学, 2015, 31(6): 99-105.
Xu Peng, Qun Zhenhua, Zhao Yaohua, et al. New-type solar

- photovoltaic and heat pump combined building energy supply system and experimental study of its performance[J]. Building Science, 2015, 31(6): 99-105. (in Chinese with English abstract)
- [20] Abu-Rumman M, Hamdan M, Ayadi O. Performance enhancement of a Photovoltaic Thermal (PVT) and ground-source heat pump system[J]. Geothermics, 2020, 85: 101809.
- [21] Nelson S, Hatef M. In-depth techno-economic analysis of PV/Thermal plus ground source heat pump systems for multi-family houses in a heating dominated climate[J]. Solar Energy, 2019, 190: 44-62.
- [22] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 公共建筑节能设计标准: GB 50189—2005[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- [23] Pang Wei, Cui Yanan, Zhang Qian, et al. Comparative investigation of performances for HIT-PV and PVT systems[J]. Solar Energy, 2019, 179: 37-47.
- [24] 杭州建设委员会. 太阳能光伏与建筑一体化应用技术导则(暂行): CJS01-2010[S]. 北京: 中国计划出版社, 2010.
- [25] 张长兴, 郭占军, 刘玉峰, 等. 土壤源热泵非稳态热流热响应试验中岩土热物性参数的确定[J]. 农业工程学报, 2014, 30(12): 192-199.
- Zhang Changxing, Guo Zhanjun, Liu Yufeng, et al. Determining parameters of rock-soil thermal properties in thermal response test of ground-coupled heat pump under working condition of transient heat flow[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(12): 192-199. (in Chinese with English abstract)
- [26] 杨静. 太阳能地源热泵复合系统理论分析及研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2012.
- Yang Jing. Theoretical Analysis and Study on Solar-ground Compound Source Heat Pump System[D]. Jinan: Shangdong Jianzhu University, 2012. (in Chinese with English abstract)
- [27] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 地源热泵系统工程技术规范: GB 50366—2005[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [28] 杨少刚. 基于 TRNSYS 地埋管地源热泵变流量系统仿真研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2016.
- Yang Shaogang. The Simulation Study of Ground-Source Heat Pump Variable Flow Rate System based on TRNSYS[D]. Jinan: Shangdong Jianzhu University, 2016. (in Chinese with English abstract)
- [29] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 太阳能供热采暖工程技术规范: GB 50495-2009[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- [30] Zhang Changxing, Hu Songtao, Liu Yufeng, et al. Optimal design of borehole heat exchangers based on hourly load simulation[J]. Energy, 2016, 116: 1180-1190.
- [31] 钱程, 徐伟. 严寒地区土壤源热泵系统的运行性能分析[J]. 建筑科学, 2008, 24(12): 77-80.
- Qian Cheng, Xu Wei. Simulation analysis on operating performance of GCHP in severe cold area[J]. Building Science, 2008, 24(12): 77-80. (in Chinese with English abstract)

Operation characteristics of the composite system for combing solar PV/T collector and ground-coupled heat pump

Zhang Changxing¹, Xu Hang¹, Lu Jiahui¹, Liu Yufeng¹, Peng Donggen²

(1. Shandong Provincial Key Laboratory for Disaster Prevention and Mitigation in Civil Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

Abstract: Photovoltaic/thermal (PV/T) system can absorb the solar energy, while generating electricity and heat, due mainly to its combining the photovoltaic and solar thermal hybrid energy conversion. PV panels as core components of PV/T system are generally cooled under the circulating fluid for high efficiency of power generation in the utilization of solar thermal energy. As such, a current PV/T system can offer electricity and heat for the building, while effectively shorten the investment cycle, compared with the PV system. Lastly, a solar PV/T collector and a ground-coupled heat pump (PV/T-GCHPs) are combined to serve as an improved energy supply system for the complementary utilization of solar energy and shallow geothermal energy. In this study, a PV/T-GCHPs mathematical model was presented for the cooling/heating demand of a 6-floor employee apartment, further to evaluate the performance of the system when simulating the operation characteristics. The results showed that the surface temperature of PV panels decreased significantly, due mainly to the cooling effect of the borehole heat exchanger (BHE) in the PV/T-GCHPs, indicating a higher PV efficiency than before. The temperature of PV panels in the PV/T-GCHPs was 44.69% lower than that of the PV system at noon on a typical day (April 2), whereas the PV efficiency was 12.12% higher than that of the PV system at the same time. The total power generation increased by 20 322 kWh in the power generation of PV panels in the PV/T-GCHPs, compared with the PV system in 20 years. The maximum monthly power generation increased 13.62%, while, the minimum monthly power generation increased 8.67%, compared with the PV system in the first year of PV/T-GCHPs operation. The minimum monthly average PV efficiency was 16.23% in the PV/T-GCHPs, 4.47% higher than that in the PV system. The solar energy was used to charge the ground in the whole life cycle of PV/T-GCHPs (20 years). The average temperature of ground corresponding to the 175 200 h was 2.5 °C higher than that in the GCHPs. The ground temperature was kept from dropping rapidly, which was caused from the imbalance of cooling and heating loads in buildings. The total length of BHEs in the PV/T-GCHPs was shortened by 600 m than that in the GCHPs under the same building load. The 20-year mean coefficient of performance (COP) of PV/T-GCHPs was 5.21 in the whole life cycle, 32.23% higher than that of GCHPs through the initial investment of BHEs in the PV/T-GCHPs system. There was a significant economic benefit in the direct cost saving (in this case of 77 192.45 Yuan cost-saving), compared with the GCHPs in the life cycle. The finding can provide a promising theoretical foundation for the popularization and application of the PV/T-GCHPs system in cold regions of China.

Keywords: COP; power generation efficiency; PV/ T-GCHPs; borehole heat exchanger