

文章编号: 1671-6612 (2025) 05-660-10

基于串并复合流道的 PV/T-空气源热泵系统协同性能研究

孙世杰 王志浩 邓诗涵 李无言 王 鹿 黄 胜

(昆明理工大学建筑工程学院 昆明 650500)

【摘 要】 传统光伏/光热 (PV/T) 系统存在散热能力有限、光电转换效率偏低及热能品位不足等技术瓶颈, 这些因素严重制约了系统的能量输出性能和应用范围拓展。现有技术中, 串联型 PV/T 集热器主要优化热性能, 而并联型则侧重提升电性能。研究创新性地提出一种串-并复合流道结构的 PV/T 集热器, 通过户外实测对比实验 (包括传统 PV 系统、串联式 PV/T、并联式 PV/T 及新型串-并联 PV/T), 并基于 TRNSYS 平台建立 PV/T-热泵耦合系统模型进行仿真分析。研究结果表明, 在 1L/min 的质量流速下, 并联型 PV/T 较传统 PV 组件实现 17℃ 的温降, 表现出优异的电性能; 串联型 PV/T 系统表现出优异的热力学性能, 其热效率和一次节能效率分别达 44.78% 和 74.77%; 新型复合系统的电效率较串联系统提高了 12%, 热效率较并联系统提高了 28%。新型流道的设计打破了传统 PV/T 系统热电互斥的困境。由于热效率的差异, 三种结构的 PV/T 系统产生了不同出口温度的热水。在与空气源热泵耦合后系统性能呈现差异化表现, 串联型、串-并联型和并联型 PV/T 耦合系统的平均 COP 分别为 2.49、2.50 和 2.55。研究不仅为 PV/T 系统的热电协同优化提供了新的技术方案, 同时阐明了 PV/T 与热泵系统的耦合作用机制, 对促进建筑一体化可再生能源技术的发展具有重要的工程应用价值。

【关键词】 太阳能; 光伏/光热; 空气源热泵; COP

中图分类号 TU83 文献标志码 A

Study on the Synergistic Performance of the PV/T-Air-Source Heat Pump System Based on the Series-Parallel Composite Flow Channel

Sun Shijie Wang Zhihao Deng Shihan Li Wuyan Wang Lu Huang Sheng

(Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Kunming University of Science and Technology, Kunming, 650500)

【Abstract】 Traditional photovoltaic/thermal (PV/T) systems face technical bottlenecks such as limited heat dissipation capacity, low photoelectric conversion efficiency, and insufficient thermal energy grade. These factors severely restrict the system's energy output performance and the expansion of its application scope. Among existing technologies, series-type PV/T collectors mainly optimize thermal performance, while parallel-type ones focus on improving electrical performance. This study innovatively proposes a PV/T collector with a series-parallel composite flow channel structure. It conducts outdoor measured comparative experiments (covering traditional PV systems, series-type PV/T, parallel-type PV/T, and the new series-parallel PV/T) and establishes a PV/T-heat pump coupled system model based on the TRNSYS platform for simulation analysis. The research results show that At a mass flow rate of 1 L/min, the parallel-type PV/T achieves a temperature reduction of 17℃ compared with the

作者简介: 孙世杰 (2000.03-), 男, 硕士, 研究生, E-mail: 15094192855@163.com

通讯作者: 黄 胜 (1994.05-), 男, 博士, 讲师, E-mail: huangsheng@kust.edu.cn

收稿日期: 2025-07-12

traditional PV module, demonstrating excellent electrical performance; The electrical efficiency of the new composite system is 12% higher than that of the series-type system, and its thermal efficiency is 28% higher than that of the parallel-type system. The design of the new flow channel breaks the dilemma of thermoelectric mutual exclusion in traditional PV/T systems. Due to differences in thermal efficiency, the three PV/T systems with distinct structures produce hot water with different outlet temperatures. After coupling with air-source heat pumps, the system performances show differentiated characteristics: the average COPs (Coefficient of Performance) of the series-type, series-parallel-type, and parallel-type PV/T coupled systems are 2.49, 2.50, and 2.55 respectively. This study not only provides a new technical solution for the thermoelectric coordinated optimization of PV/T systems but also clarifies the coupling mechanism between PV/T and heat pump systems, holding important engineering application value for promoting the development of building-integrated renewable energy technologies.

【Keywords】 Solar energy; Photovoltaic/thermal (PV/T); Air-source heat pump (ASHP); COP

0 引言

人类过去使用的能源约75%来自于煤炭、石油、天然气等传统化石燃料^[1],但是传统化石能源面临着日渐枯竭以及环境危害逐渐加剧等问题^[2],因此世界各国政府一致呼吁实施“低碳”发展策略。加速能源转型、寻求可再生能源解决方案已经成为目前实现“双碳”目标的首要任务^[3]。

太阳能因为其清洁、高效、储量大等优点备受人们关注^[4,5]。近年来随着我国能源结构的调整,太阳能利用技术得到了迅速发展,其中光伏(PV)、光热(ST)技术已经普遍应用于生活和工业领域,然而PV的表面温度对于光电转换效率是一个负面因素,研究表明,PV模块的表面温度每上升一度,其发电量将减少0.45%^[6],为了接触这一限制,PV/T技术应运而生。PV/T系统由集热器和PV模块集合而成,冷却液流经集热器,吸收光伏模块的余热用于热能转化,同时光伏模块的温度也降低,光电转换效率得到提升^[7]。集成系统比单独的PV或ST系统的产量更高,该项技术不仅解除了PV光电转换效率受温度的限制,还节省了安装空间,很大程度上提高了太阳能的整体利用率。

在此之前,许多学者们对PV/T做了大量的研究,提出了各种各样配置的PV/T系统。根据冷却介质种类大致分为:空气基、水基、制冷剂基^[8]。Chen等人^[9]提出一种空气基PV/T并针对进气温度对PV/T系统性能的影响进行了研究,光电转换效率随着进气温度的升高而降低,当温度从10℃上升到25℃时电效率下降了0.9%。这也就意味着空气基PV/T适合一些环境温度较低的地方使用。制冷剂基PV/T最为常见的是热管PV/T,热管主要由蒸发端和冷凝端组成,是一种高效的气液相变装

置,由于在相变过程中制冷剂温度恒定,当用于PV/T时能够均匀的冷却光伏板^[10-12]。Emam等人^[13]提出一种椭圆形的热管结构,试图寻找最佳纵横比,已建立具有最高传热面积和传热速率的最佳设计,结果在最佳设计条件下实现了16.36℃的温降和8.18%的发电量提升。水是一种高效且清洁的冷却介质,是目前研究最为广泛的^[14]。Lbrahim等人^[15]设计了7种集热器结构,并对其进行了仿真模拟,研究发现,螺旋式设计为最佳设计,电效率达到了11.98%,后来Fudholi^[16]又针对其中三种集热器结构,研究了流速对于系统性能的影响,研究发现系统性能受质量流速的影响显著,但并不是越大越好。除此之外,吸收管的形状也是影响PV/T系统性能的因素之一,Amin等人^[6]研究了圆形、三角形以及矩形管道对系统性能的影响,结果矩形管道的电效率在圆形管道的基础上提升了2%,原因是矩形管道的使用增大了与PV板的接触面积。

PV/T的设计初衷是为了冷却光伏电池,提高光电转换效率,这就要求集热环路在一个较低的温度下工作,这样一来,PV/T就很难在一个有用的温度下传输热量,反之集热器如果提供一个较高的温度,电效率又会损失。回顾文献发现,强化系统时,对于系统的电效率、热效率、热能品位很难做到三者兼顾,因此对于PV/T的优化侧重往往需要根据用户端需求以及当地自然环境来决定。供应生活热水时,温度至少要达到55℃,单凭PV/T系统很难达到热水供应温度,这时往往将其与热泵系统相结合,实现稳定的供应。PV/T耦合热泵的方式能够实现热电联产,甚至做到零能耗,如何实现节能、高效、高产成了研究的重要内容。热泵的进水温度对系统性能有一定的影响,袁朝阳等人^[17]针对

空气源热泵热水器加热至较高水温时系统效率明显下降的问题,研究初始水温对系统性能的影响,通过改变初始水温研究系统的变化规律,研究发现平均 COP 随初始水温的升高呈先减小后增大的趋势。杨旭东等人^[18]设计了 PV/T 耦合双热源热泵供暖系统,与空气源热泵机组单独运行对比,制热量增长 7.13%,耗电量下降 28.95%。褚磊驰等人^[19]以光伏直驱 PV/T 双源热泵热水系统为实验研究对象,验证了系统能够在离网情况下运行并完成工作任务。

综上所述,当前 PV/T 系统面临的核心矛盾在于:传统设计很难同时满足光电转化和热能转换效率同时提升且所提取热能品位较低,难以直接使用。本研究提出三种不同的集热器结构,并将其与空气源热泵耦合,对出口水再加热,研究热泵性能变化,其要创新点主要体现在以下两个方面:

(1) 流道结构创新:突破传统串联/并联流道“热电互斥”的设计局限,提出串-并联复合流道结构,通过“分流控温+串联增效”的协同设计,在不牺牲换热面积的前提下,将并联流道的低温差优势与串联流道的高换热效率结合,实现电效率

(12.1%)较串联系统提升 12%,热效率(36.71%)较并联系统提升 28%的双重优化;

(2) 耦合机制创新:建立“PV/T 出口水温-热泵 COP”的定量关联模型,明确不同流道结构的 PV/T 对热泵负荷的影响规律(如并联型 PV/T 因出口水温最低,使热泵 COP 达 2.55,较串联型提升 2.4%),为 PV/T-热泵系统的匹配设计提供定量依据,弥补现有研究中“重实验、轻机制”的不足。

1 系统设计

本研究实验系统分为两部分,第一部分为 PV/T 系统,设计三种不同结构的集热器,在真实的自然环境下进行实验,探究集热器结构变化对于 PV/T 系统的性能影响。第二部分基于 TRNSYS 搭建 PV/T 耦合空气源热泵系统,模拟三种结构 PV/T 耦合空气源热泵后,对于热泵性能的影响。

1.1 PV/T 系统设计

本研究设计了三种不同结构的集热器单元,集热器结构示意图如图 1 所示,包括(a)串联型集热器;(b)并联型集热器;(c)串-并联集热器。

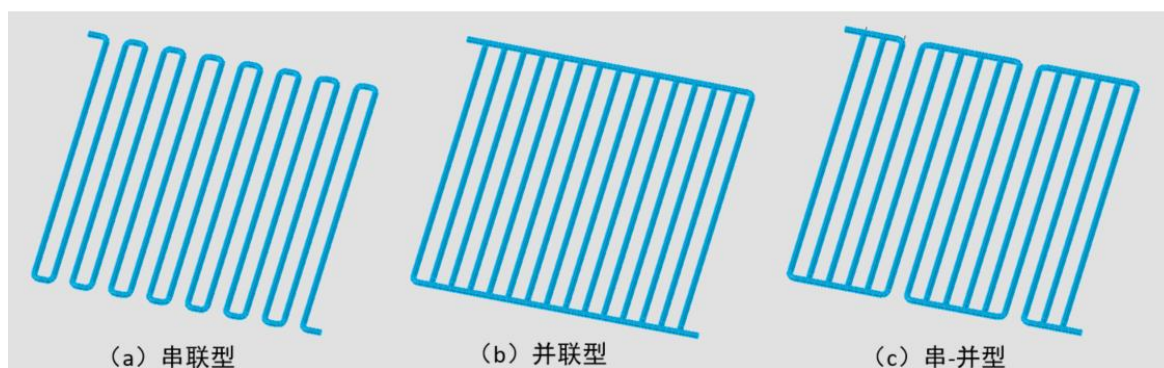


图 1 集热器结构示意图

Fig.1 PV/T Collector Structure Diagram

三种集热器流道设计的核心差异在于冷却液流场分布以及换热面积匹配逻辑。

串联型集热器采用单一路径流道(总长约 15.6m),冷却液从入口到出口持续流经整个光伏背板,换热面积覆盖 100%背板区域(约 1.04m²),但因沿程吸热导致流体温度梯度较大(以 1L/min 为例,入口 19±2℃,出口 24±3℃),后期换热温差衰减。

并联型集热器采用 28 路等径分流道(单路长约 0.56m),冷却液经分流阀均匀分配至各流道,

每路仅覆盖小部分背板区域,虽总换热面积与串联型一致,但因单路流体吸热时间短,进出口温差仅 3.24±0.5℃,换热效率更稳定。

串-并联型集热器采用“4 级分流+串联”复合结构:一级分流将流体分为 7 路主通道(每路长 2.24m),每路主通道再分为 4 路支通道(每路长 0.56m),形成“先并后串”的流场形态,既通过分流降低单路流体温度梯度,又通过串联延长有效换热时间,实现“温差控制”与“换热效率”的平衡。

三种结构的集热器分别附着于光伏电池的背面, 实验过程中低温热水流经集热器管道, 随管道覆盖整个光伏组件的背板区域, 吸收光伏组件的余热, 降低光伏板的温度尽可能提高产电, 升温后的水可供后续使用, 充分提高太阳能的利用率。



图 2 PV/T 背板布置示意图

Fig.2 Schematic of PV/T Backsheet Layout

PV/T 太阳能集热系统由光伏组件, 铜管集热器以及铝箔海绵保温层组成。集热器管道可以使用不同的材料, 如: 铝、锌、铜、钢等, 由于铜有着良好的导热性, 本次实验采用了内径为 9.52mm 的紫铜管。为了使铜管集热器与光伏板紧密接触, 使用螺帽绞合固定将集热器紧紧贴合到光伏板背面, 并使用热膏, 让光伏板与集热器之间可以更好的传热。此外, 为了防止热量从集热器散失到周围的环境中, 在系统的背面使用铝箔保温棉作为隔热材料。

实验使用了一块单晶硅太阳能电池, 尺寸为 1354mm×767mm, 标况输出功率为 225W。PV/T

系统的能量输出包括电能和热能两部分。系统的电功率输出采用 MPPT 太阳能控制器进行监测, 光伏转换的电能经过 MPPT 后储存到铅酸蓄电池中。冷却流体使用自来水, 集热器入口处和出口处布置 K 型热电偶和及流量计测试进出口温差, 以此测试 PV/T 产生的热量。光伏背板布置 21 个温度测点, 使用 PT-100 温度传感器来监测光伏板温度和环境温度。搭建的实验系统如图 3 所示。

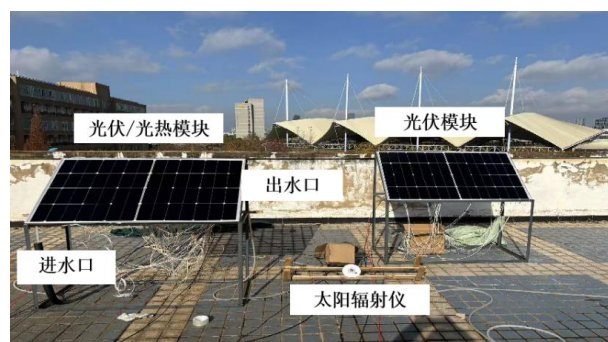


图 3 PV/T 系统实验平台示意图

Fig.3 Schematic of PV/T System Experimental Platform

1.2 PV/T 耦合空气源热泵热水系统

PV/T 耦合空气源热泵系统原理图如图 4 所示, 该系统主要由光伏子系统和空气源热泵子系统两部分组成, 能够实现热电联供。其中光伏子系统由光伏电池、集热器、具有 MPPT (最大功率点追踪) 功能的光伏控制器和逆变器组成; 热泵子系统由 PV/T 集热器、风冷式换热器、压缩机、套管式冷凝器、电子膨胀阀和保温水箱组成, 制冷工质为 R134a。

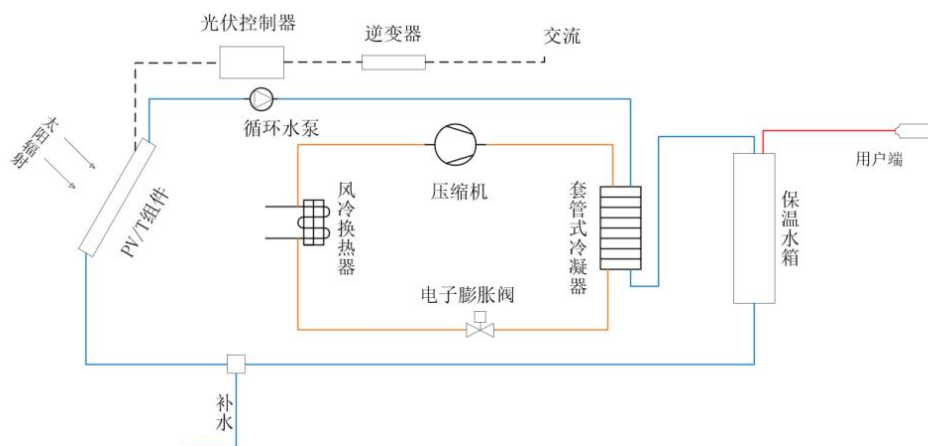


图 4 PV/T 耦合空气源热泵系统图

Fig.4 Schematic of PV/T-Coupled Air-Source Heat Pump System

PV/T 与空气源热泵的耦合形式为串联, 系统运行时, 冷却水先流过 PV/T 集热器吸收太阳能完成一次加热, 此后在流经热泵系统提升热能品位达到生活热水要求。制冷剂 R134a 经过风冷式换热器蒸发从环境中吸热, 然后流经压缩机形成高温高压的制冷剂气体再进入冷凝器, 制冷剂气体与来自 PV/T 的低温热水换热, 换热后的制冷剂流经电子膨胀阀变回低温低压状态后回到风冷式换热器, 完成一次热泵循环。

图 5 为 PV/T 耦合空气源热泵热水模型。该系统核心原理在于利用 PV/T 的低品位余热来降低热泵的加热负荷:

第一阶段 (PV/T 预加热): 自来水 (初始温度 $16\pm 3^{\circ}\text{C}$) 流经 PV/T 集热器, 吸收光伏背板余热

后温度升至 23.3°C – 25.3°C , 此过程可回收光伏系统约 29%–45% 的废热 (基于实验测试), 减少热泵后续加热所需的焓变;

第二阶段 (热泵深度加热): 预加热后的水进入热泵套管式冷凝器, 与高温高压的 R134a 制冷剂 (冷凝温度 55°C – 60°C) 进行换热, 水温升至 55°C (生活热水标准温度), 相比传统空气源热泵 (直接加热 16°C 自来水至 55°C), 本系统可使热泵的制热功率需求降低。

然而影响热泵性能的因素众多, 为了探究三种结构的集热器 PV/T 与热泵耦合后的性能变化, 基于 TRNSYS 搭建空气源热泵热水系统, 将 PV/T 出口水作为空气源热泵的初始水温, 研究其性能变化。

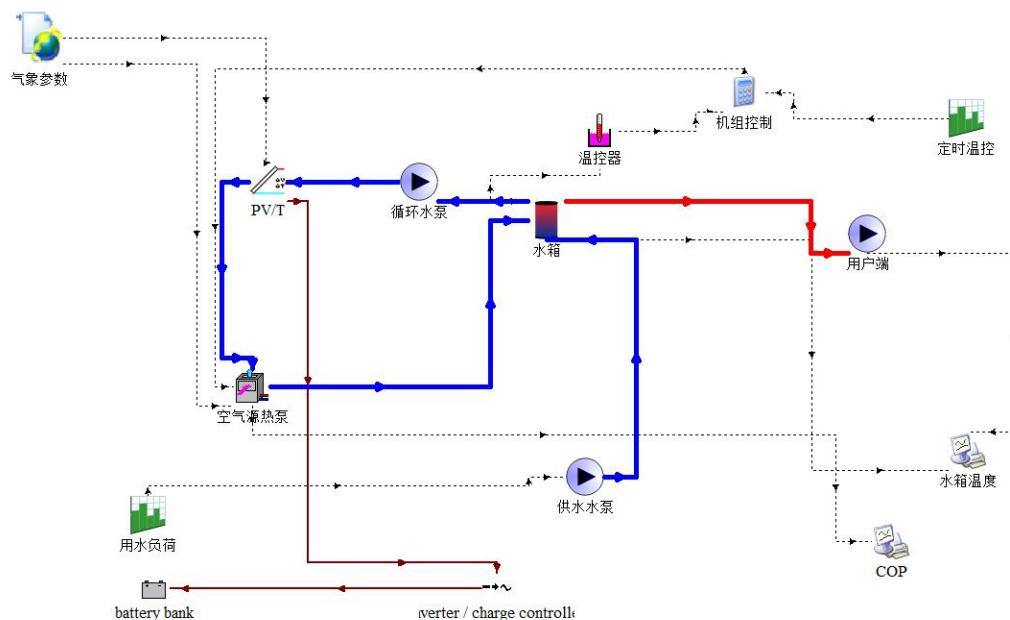


图 5 PV/T 耦合空气源热泵热水系统模型

Fig.5 Model of PV/T-Coupled Air-Source Heat Pump Hot Water System

2 PV/T 系统性能评价指标

PV/T 系统能够同时产生电能和热能, 系统的性能可以通过效率表达的组来描述, 表达式中的效率 η_{el} 用来衡量电性能, 热效率 η_{th} 用来衡量热性能, η_f 用于评价 PV/T 的综合性能。

PV/T 系统的热效率可以通过传统平板太阳能集热器的热效率公式来计算^[20]。

$$\eta_{th} = \frac{Q_u}{A \times G} \quad (1)$$

式中: Q_u 为收集到的可利用的热量, W; A 为集热器的面积, m^2 ; G 为太阳辐射, W/m^2 。

收集到的可利用的热量 Q_u 由式 (2) 给出。

$$Q_u = m C_p (T_{out} - T_{in}) \quad (2)$$

式中: m 为水的质量流速, kg/s ; C_p 为水的比热容, $\text{J}/\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C}$; T_{in} 为流体的进口温度; T_{out} 为流体的出口温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

PV/T 系统的电效率 η_{el} 为系统的电功率输出与太阳辐射强度的比值。

$$\eta_{el} = \frac{Q_e}{A \times G} = \frac{I_m \times U_m}{A \times G} = \frac{P_{\max}}{A \times G} \quad (3)$$

式中: Q_e 为系统的电能输出; I_m 和 U_m 为最大功率点处的电流和电压。

在热力学中,电能属于高品位能源,热能可以从电能中 100% 获取,反过来却不行,所以同样大小的电能与热能不能直接比较,因此,引入一次节能效率 η_f 作为 PV/T 系统的综合性能评价。

$\eta_p = 0.36$, 是与热发电厂相关的发电效率^[6]。

$$\eta_f = \frac{\eta_{el} + \eta_{th}}{\eta_p} \quad (4)$$

热泵系统的制热功率 P_{heat} 为热泵进出口水温差与质量流量的乘积; T_a 为热泵的进口水温; T_b 为热泵的出口水温。

$$P_{heat} = mC_p(T_b - T_a) \quad (5)$$

COP 是衡量热泵效率的重要指标,为系统制热功率与热泵耗电功率的比值。

$$COP = \frac{P_{heat}}{P_{con}} \quad (6)$$

式中: P_{con} 为热泵的耗能。

3 数据分析

3.1 天气状况

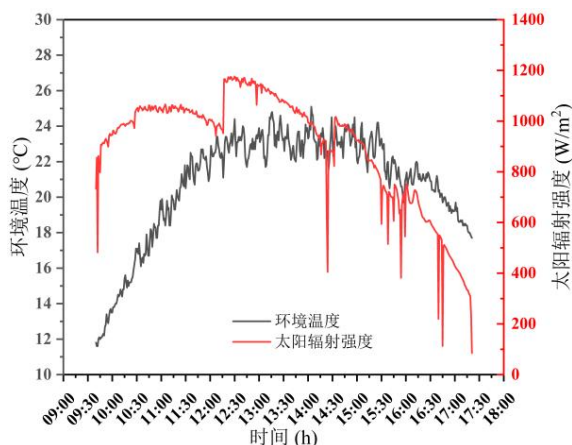


图6 太阳辐射和环境温度变化情况

Fig.6 Variation of Solar Radiation and Ambient Temperature

实验选于 2024 年 12 月至 2025 年 1 月期间进行,这段时间内天气状况良好且天气情况相似,收集器表面的太阳辐射强度能够满足实验需求。以

2024 年 12 月 30 日为例,图 6 展示了太阳辐射环境温度变化的情况。结果表明,收集器在上午 10 时至下午 18 时之间暴露于 235-1176 W/m² 的太阳辐射和 12-25°C 的环境温度。

3.2 不同结构集热器对 PV/T 系统性能的影响

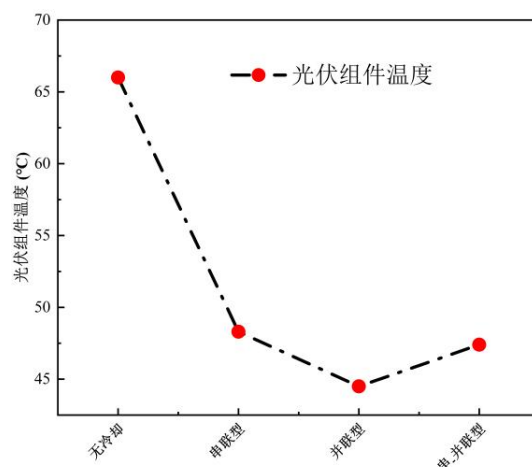


图7 三种结构集热器 PV/T 系统的板面平均温度情况

Fig.7 Average Panel Surface Temperature of PV/T Systems with Three Collector Structures

图 7 展示了中午 12 时,无冷的 PV 系统以及三类不同结构集热器 PV/T 系统在 1 L/min 流速工况下光伏板的平均温度。无冷却的光伏板平均温度高达 66°C,在加入集热器后,光伏板的温度得到控制,其中并联型 PV/T 的光伏板冷却效果最好,温度最为均匀,平均温度为 44.5°C;采用串-并型集热器时,平均温度为 47.4°C,串联型冷却效果相对较差,平均温度为 48.3°C,比并联型高了 3.8°C。这是因为在相同的流速条件下,冷却水流经不同换热面积导致的,串联型集热器内冷却水流经面积最大,水温度逐渐升高,总体换热效果逐渐降低,并联型集热器内冷却水流经面积最小,水温上升较为缓慢,换热效果较好,因此板面平均温度较低。串-并型集热器与串联型相似,但是冷却水流经面积比串联型小,比并联型大,因此板面温度处于二者之间。

图 8 显示了无冷却的 PV 系统和三种结构集热器 PV/T 系统在测试期间电效率的变化情况,测试从上午 9 时 30 分开始,此时的太阳辐射已经覆盖整个光伏组件。从 9 时 30 分到下午 14 时,三种结

构的电效率总体上呈现出下降趋势,原因是这段时间,太阳辐射逐渐增大,光伏光热组件蓄热导致温度也逐渐上升,电效率也逐渐恶化。14 时后,太阳辐射逐渐减小,光伏光热组件温度下降,电效率迎来提升。由于三个结构的集热器 PV/T 测试不是在同一天进行且过程中出现云彩遮荫、太阳辐射不断变化等情况,从而电效率也会随之产生波折变化趋势存在差异,但是光伏转化效率的总体变化趋势正常,且结构变化也呈现出效率差异。其中无冷却 PV 的平均电效率为 9.36%,串联式集热器 PV/T 的平均电效率为 10.8%,比无冷却工况提升了 15.3%;串-并式的为 12.1%,比无冷却工况提升了 29.2%;并联式集热器 PV/T 的电效率最佳,达到了 13.31%比无冷却工况提升了 42.2%。

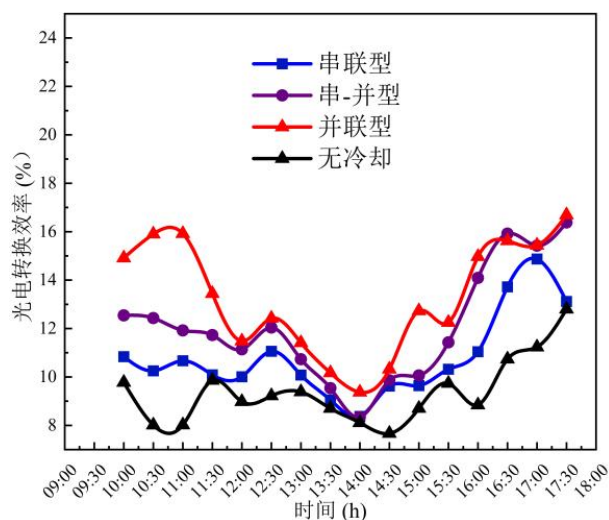


图 8 无冷却的 PV 系统和三种结构集热器 PV/T 系统电效率情况

Fig.8 Electrical Efficiency Variation of the Non-Cooled PV System and PV/T Systems with Three Collector Structures

图 9 展示的是三种结构集热器 PV/T 的热效率在 1L/min 质量流量时一天中的变化情况,热效率的变化相较于电效率比较平稳。与电效率相反,串联型集热器 PV/T 的平均热效率最高,为 44.78%,而并联型的集热效率最低,为 28.8%,串-并型的热效率与电效率一样,处于二者之间,为 36.71%。换热效率与换热面积有着绝对的关系,前面提到,串联型集热器中冷却水流经面积最大,因此串联型集热器 PV/T 的热效率最高,其次是串-并型,最低的是并联型。

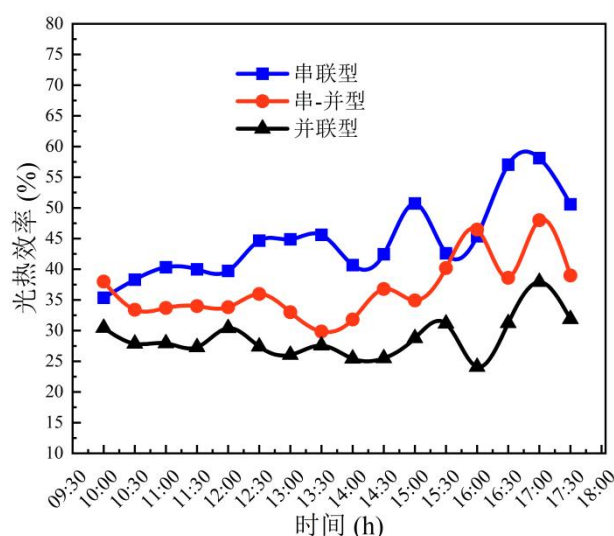


图 9 三种不同结构的集热器 PV/T 系统的热效率情况对比
Fig.9 Comparison of the Variation of Thermal Efficiency of PV/T Systems with Three Different Types of Collector Structures

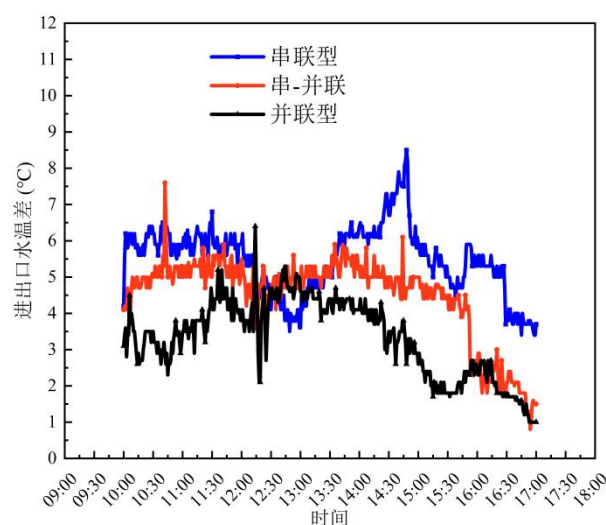


图 10 三种结构集热器的冷却水进出口温度随时间变化情况
Fig.10 Variation of Cooling Water Inlet and Outlet Temperatures for Collectors with Three Structures with Time

图 10 表示的是三种集热器结构进出口温差随时间的变化情况。进出口水温差的变化随太阳辐射发生改变,每天温差最大的时间大约为下午 14 时左右,此时太阳辐射也是一天中最大的时刻。对比三种结构,加热效果最好的为串联结构,最大温差为 7.04°C,日平均温差为 5.47°C。串-并结构的平均温差为 4.32°C,与串联结构相比下降了 1.15°C。并联结构平均温差为 3.24°C,比串-并结构下降了

1.07℃。串-并结构的换热效果位于串联和并联结构之间,这就造成了进出口温差比串联结构低,比并联结构高的结果。与热效率的变化趋势有一致性。

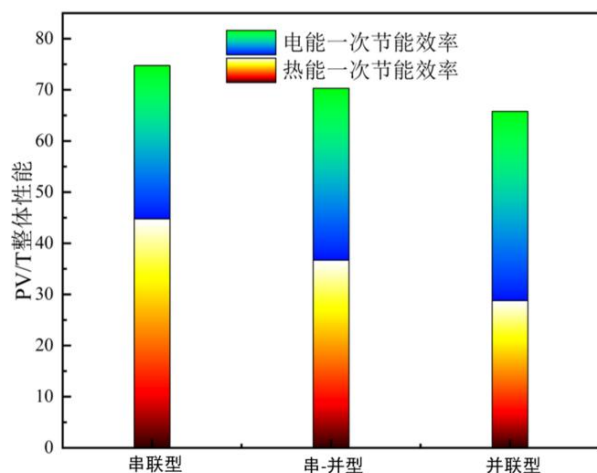


图 11 三种不同结构的集热器 PV/T 系统的一次节能效率情况

Fig.11 Primary Energy-Saving Efficiency Variation of PV/T Systems with Three Different Collector Structures

图 11 为三种系统在 1L/min 流速下的一次节能效率对比图。从热力学角度上来看,电能几乎可以百分百转换为热能,反之则不可能。由于热能和电

能经济价值不相等,所以用一次能源效率来比较系统的整体效率。从结果上来看,一次节能效率最高的是串联结构,达到了 74.77%,这得益于串联型集热器 PV/T 出色的热效率。其次是串-并型集热器 PV/T 的 70.32%,并联型的 65.79%。从一次节能效率的角度来看,牺牲部分热效率换来的电效率提升没有给一次节能效率带来提升。

3.3 PV/T 耦合空气源热泵系统的性能

太阳能耦合热泵有着可以同时提高太阳能利用率与热泵性能的优势,近年来国内外学者对太阳能耦合热泵展开了大量的研究和探索。其中将 PV/T 与热泵耦合就是重要的研究内容。本节基于 TRNSYS 模拟 PV/T 耦合空气源热泵系统,主要探究空气源热泵与 PV/T 系统耦合后,空气源热泵的性能变化,研究不同进水温度对于空气源热泵性能的影响。

前面提到三种结构的集热器 PV/T 系统分别在电性能、热性能方面都有着明显的差异,对空气源热泵的再加热过程而言,不同之处在于初始水温存在差异,串联集热器 PV/T 的出口平均温度为 25.3℃,串-并联的为 24.9℃,并联的为 23.3℃,初始水温的变化会对热泵系统的性能有一定的影响。

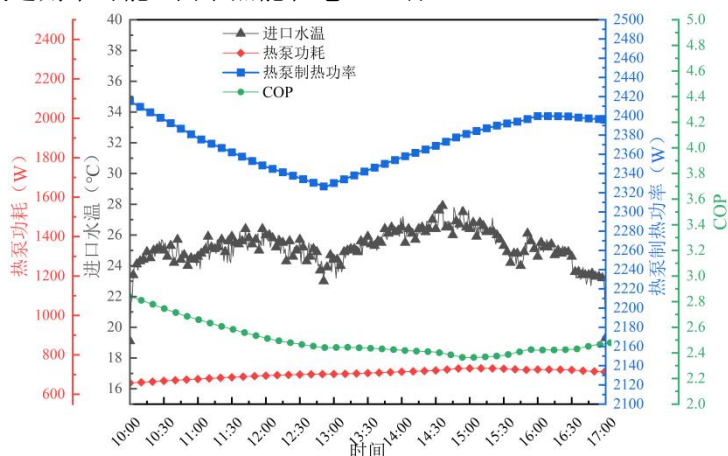


图 12 串联型集热器 PV/T 耦合空气源热泵系统性能情况

Fig.12 Performance Variation of the Series-Type Collector PV/T-Coupled Air-Source Heat Pump System

图 12 为串联型集热器 PV/T 耦合空气源热泵系统的性能随时间变化情况,该耦合系统的平均制热功率为 2370.8W,平均 COP 为 2.49,平均压缩机功耗为 704.7W。测试期间进口水温受环境工况影响,呈现先升高后降低的波动趋势,其变化对热泵制热功率产生显著影响,10:00-13:00 期间,制

热功率受进口水温影响较明显,随进口水温升高而衰减,随后水温回升逐步恢复并趋于稳定,13:00 后环境温度上升,起到主导作用,制热量逐步提升。热泵功耗在测试时段内维持相对平稳,反映系统输入功率的稳定性。COP 作为能效评价指标,与制热功率、进口水温协同变化,随进口水温升高、制

热功率衰减而减小, 后续伴随初始水温逐渐降低与 制热功率回升, COP 逐步回升。

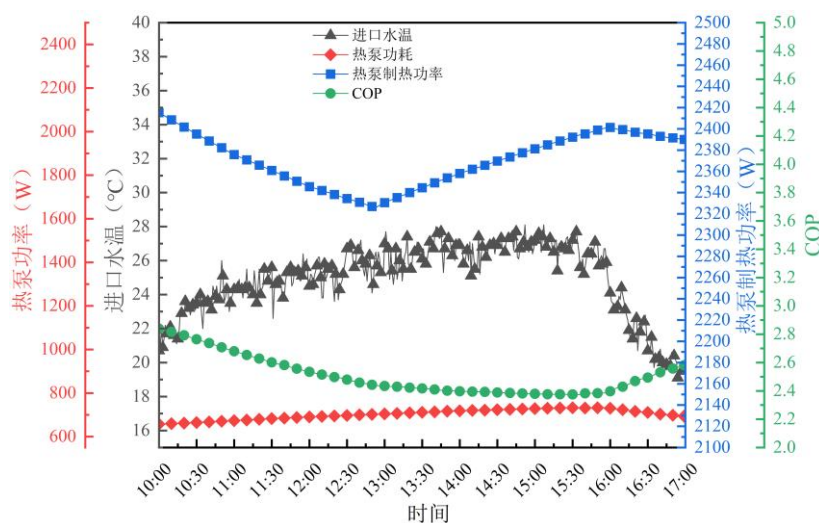


图 13 串-并联型集热器 PV/T 耦合空气源热泵系统性能情况

Fig.13 Performance Variation of the Series-Parallel-Type Collector PV/T-Coupled ASHP System

图 13 为串-并联集热器 PV/T 耦合空气源热泵系统性能随时间的变化情况, 该耦合系统的平均制热功率为 2370.3W, 平均 COP 为 2.5, 平均压缩机功耗为 703W, 测试期间, 初始水温受环境影响呈现出阶段性波动, 总体上呈现水温上升的趋势,

15:30 后由于太阳辐射降低, 进口水温出现了较为明显的下降趋势, 热泵性能方面, 对应机组进水温度, 随温度上升, 机组 COP 有所下降, 可以看出, 进水温度的波动相对于热泵 COP 波动更为明显。

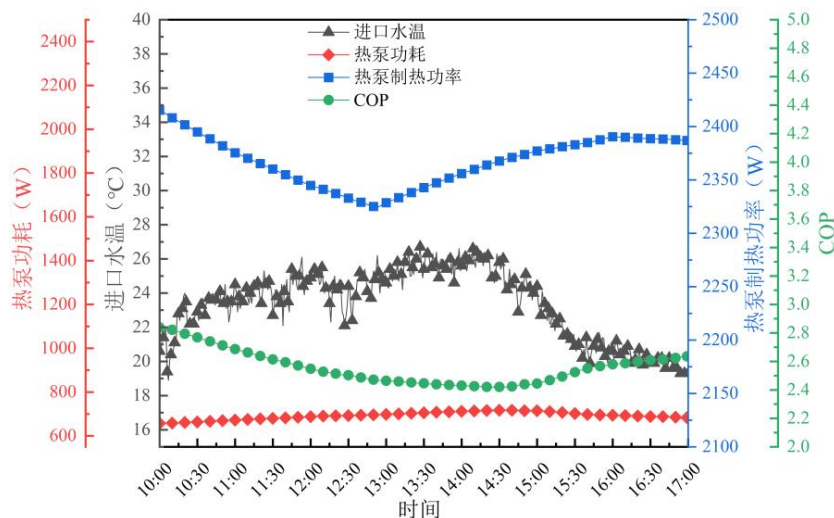


图 14 并联型集热器 PV/T 耦合空气源热泵系统性能情况

Fig.14 Performance Variation of the Parallel-Type Collector PV/T-Coupled ASHP System

图 14 为并联集热器 PV/T 耦合空气源热泵系统性能随时间的变化情况, 该耦合系统的平均制热功率为 2367W, 平均 COP 为 2.55, 平均压缩机功耗为 692W, 进口水温在后期呈现出下降趋势, 热泵系统的性能变化情况对应于进口水温波动, 变化趋势与上述两种耦合系统相似。

图 15 是三种 PV/T 耦合热泵系统的 COP 变化情况。对比三种耦合系统后发现, 热泵 COP 值表现出差异。串联 PV/T 耦合热泵的平均 COP 为 2.49, 串-并联 PV/T 耦合热泵为 2.50, 并联 PV/T 耦合热泵为 2.55。出现差异的原因是三种系统初始水温不同, 更低的进水温度使得热泵能效水平相应提高。

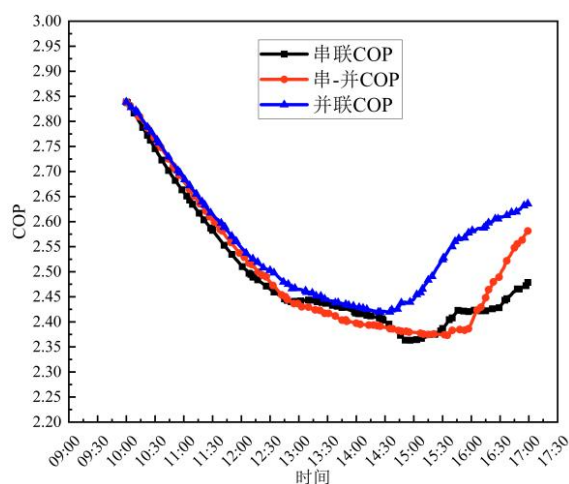


图 15 三种结构集热器 PV/T 耦合空气源热泵系统的 COP 随时间变化情况

Fig.15 COP Variation with Time of PV/T-Coupled ASHP Systems with Three Types of Collectors

4 结论

本文针对传统 PV/T 系统“热电互斥”及热能品位低的核心问题,创新设计串-并联复合流道 PV/T 集热器,并建立 PV/T-空气源热泵耦合系统,通过实验与仿真结合的方法,揭示流道结构对 PV/T 热电性能的调控机制及耦合系统的能效提升规律,主要创新结论如下:

在 1L/min 流速条件下,各 PV/T 系统光伏板温度梯度显著:串联型(48.3℃)>串并联型(47.4℃)>并联型(44.5℃),对应电效率分别为 10.8%、12.1% 和 13.31%;串联型系统展现优异热力学性能,其集热器进出口温差达 5.4℃,热效率与一次能源效率分别达 44.78%和 74.77%,较并联型系统分别提升约 55.5%和 13.6%。

将三种 PV/T 与空气源热泵系统耦合,平均 COP 值分别为串联型 2.49,串-并型 2.5,并联型 2.55。实验开始阶段,进口水温对于热泵的性能影响占主导,COP 和制热功率随水温的升高而衰减,随着环境温度上升,后期环境温度对热泵性能影响站主导,性能逐步提升。

综上本文提出的三种集热器 PV/T 分别在电性能、热性能方面有着各自的优势,新型串-并联集热器 PV/T 平衡了传统 PV/T 系统热、电效率此消彼长的关系,相较于串联系统电效率提高了 12%,热效率较并联系统提高了 28%。PV/T 与热泵耦合

的实验结果揭示了 PV/T 对热泵的影响机制,为 PV/T 耦合空气源热泵系统的优化设计提供了理论依据和实验验证。

参考文献:

- [1] Satpute J, Srinidhi C, Rathore S S, et al. Parametric influence and efficiency assessment of water-cooled photovoltaic thermal PV/T absorber designs[J]. Energy, 2025,320:135218.
- [2] Maina N M, Murray J, McKenzie M. Climate change and the fossil fuel divestment movement in Canadian higher education: The mobilities of actions, actors, and tactics[J]. Journal of Cleaner Production, 2020,253: 119874.
- [3] Mostakim K, Hasanuzzaman M. Global prospects, challenges and progress of photovoltaic thermal system[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2022,53:102426.
- [4] Cao X, Li N, Li Y, et al. A review of photovoltaic/thermal (PV/T) technology applied in building environment control[J]. Energy and Built Environment, 2025,6(3):402-431.
- [5] Weiss W, Spörk-Dür M. Solar Heat Worldwide 2024[R]. IEA SHC, 2024.
- [6] Shahsavari A, Eisapour M, Talebizadehsardari P. Experimental evaluation of novel photovoltaic/thermal systems using serpentine cooling tubes with different cross-sections of circular, triangular and rectangular[J]. Energy, 2020,208:118409.
- [7] Michael J J, S I, Goic R. Flat plate solar photovoltaic-thermal (PV/T) systems: A reference guide[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015,51:62-88.
- [8] Kandeal A W, Thakur A K, Elkadeem M R, et al. Photovoltaics performance improvement using different cooling methodologies: A state-of-art review[J]. Journal of Cleaner Production, 2020,273:122772.
- [9] Chen Y, Duan Q, Liu Y, et al. A comparative experimental study on the performance of photovoltaic thermal air collectors[J]. Applied Thermal Engineering, 2024,248:123109.

(下转第 703 页)