

# 太阳能光伏热泵研究进展

牛擎宇, 宋子晔, 关欣\*

上海理工大学能源与动力工程学院, 上海  
Email: 17864299979@163.com, \*15900722038@163.com

收稿日期: 2021年1月20日; 录用日期: 2021年2月17日; 发布日期: 2021年2月25日

---

## 摘要

对太阳能光伏热泵系统的发展过程进行了回顾。根据近些年来国内外相关学者对于光伏热泵方面的研究工作; 介绍了直膨式与间膨式光伏热泵方面的研究进展, 指出喷射器代替节流阀植入到系统, 可以大量减少节流损失, 提升热泵系统性能并在前人的研究基础上, 提出了带喷射器的CO<sub>2</sub>间膨式光伏热泵系统的设想, 以期对未来的研究工作有一定的启发作用。

## 关键词

间膨式光伏热泵, 光伏热泵分类, 喷射器

---

# Research Progress of Solar Photovoltaic Heat Pump

Qingyu Niu, Ziyi Song, Xin Guan\*

School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai  
Email: 17864299979@163.com, \*15900722038@163.com

Received: Jan. 20<sup>th</sup>, 2021; accepted: Feb. 17<sup>th</sup>, 2021; published: Feb. 25<sup>th</sup>, 2021

---

## Abstract

The development process of solar photovoltaic heat pump system is reviewed. According to the research work of relevant scholars at home and abroad on photovoltaic heat pump in recent years, direct expansion are introduced with the type of room and progress of solar heat pump, this paper points out that the injector to replace the throttle valve into the system can significantly reduce the throttling loss, improve heat pump system performance and on the basis of forefathers' research puts forward the belt between the CO<sub>2</sub> injector of photovoltaic pump system in order to have some inspiration for future research work.

---

\*通讯作者。

## Keywords

### Expandable Photovoltaic Heat Pump, Photovoltaic Heat Pump Classification, Injector

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

太阳能在目前的清洁能源中,无论是在资源还是在规模上都是最为庞大的,其通过辐射输送到地球表面的能量总量达到了  $1.7 \times 10^{14}$  kW,经过数据转换,每秒能够达到的能量为  $4.994 \times 10^{10}$  J,相当于 500 万吨标准煤。中国的太阳能资源在世界中排名前列,年日照时长数超过 2000 小时的地区占到全国陆地总面积的 65% 以上[1]。其中太阳能热泵技术和光伏发电技术作为太阳能利用的两种不同方式,近几十年得到了迅速发展。

早在 2013 年,中国的新光伏装机容量就占据了世界总产量的 30% 以上,成为世界上最大的光伏市场和生产者。研究报告指出,中国拥有世界上排名第一的太阳能热水器产量[2],但商业光伏电池组件的光电转换效率大约是 6%~15%,太阳能照射在光伏电池的表面,85% 以上的份额被反射或转换成热能,部分内能被转换成电能,其工作温度的升高使光电转换效率降低[3]。为了解决这个缺陷,在光伏电池背面铺设流道,光伏电池利用流体温度进行降温,改善光电转换效率,并试图使用流体吸收的热量,即综合利用光伏光热技术(PV/T),现有的研究主要是水和空气作为冷却介质的 PV/T 系统,相关研究表明,水作为冷却介质可以获得比空气冷却更好的效果[4],但由于水需要加热到较高的温度才是有效的,因此对光伏组件的冷却效果和随后的电气效率提高通常是不够的[5] [6]。它将不可避免地减少电池的冷却效果,冷却介质在热泵系统的蒸发器温度低,波动较小,如果 PV/T 系统的传热方式以热泵循环为主要途径,光伏电池和热泵蒸发器组合成一个整体把太阳能光热转换的能量由工作介质蒸发过程吸收,利用热泵循环在冷凝段高温输出,这样既能使光伏电池保持低而稳定的工作温度,提高光电转换效率,还能利用热泵系统优越的传热性能,得到远高于系统功耗的能量。本文将对国内外关于太阳能光伏热泵的研究工作进行综述,并提出一种新型带喷射器的 CO<sub>2</sub> 间膨式光伏热泵。

## 2. 直膨式光伏热泵

如图 1 所示,太阳能热泵系统的光伏电池和蒸发器有机结合,形成 PV/T 蒸发器。在 PV/T 蒸发器接收的太阳辐射中,一部分辐射由光伏电池通过光电转换产生,形成电流输出,另一部分通过光热转换照射。

光伏太阳能热泵最早提出于 20 世纪 90 年代。日本学者 Ito 和 Miura [7]对采用光伏电池热泵系统进行了实验研究,用 PV-SAHP 系统中的并联空气源换热器提高了热泵在低太阳辐射环境条件下的性能。国内虽然起步较晚但近十几年内,中国科学技术大学、东南大学、上海理工大学、上海交通大学等在此方面取得了很大的进步(见表 1),中国科学技术大学裴刚、季杰[8] [9]等提出了一种直膨式光伏热泵系统,并建立了系统动态数学模型进行数值仿真,仿真结果表明,该系统的光伏发电效率较普通太阳能发电效率提高了 16.0%,光伏光热综合效率达到 84.7%,受系统结构参数对太阳能热泵性能影响较大。此外,裴刚团队[10]在香港建立了以 R134A 为工质的 PV-SAHP 进行连续生产热水。模拟结果表明,年平均 COP 为 5.93,年平均电效率为 12.1%,夏季产热量可达冬季的两倍,在香港具有良好的应用潜力。

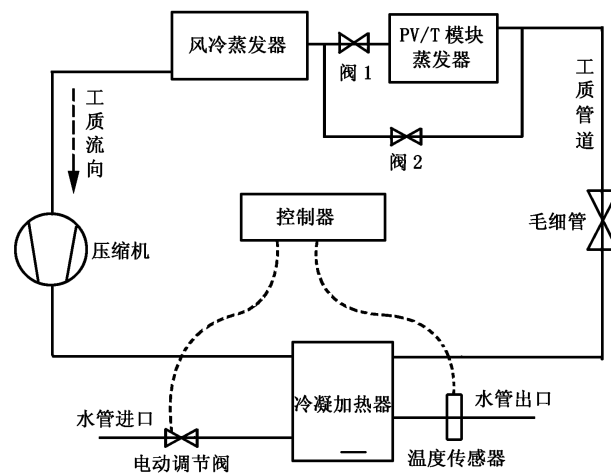


Figure 1. Picture of direct expansion photovoltaic heat pump system  
图 1. 直膨式光伏热泵系统图

Table 1. Research results of direct expansion photovoltaic heat pump

表 1. 直膨式光伏热泵研究成果

	研究者制冷剂系统针对工况优劣性
裴刚[8]	R22 温度 22.97℃, 平均直射辐照 661.68 w/m <sup>2</sup> 系统 PV/T 蒸发器的光电/光热综合效率高达 84.7%, 但未做详细经济分析
徐国英[11]	R134A 辐照度为 552 w/m <sup>2</sup> , PV/T 温度 25℃~35℃ 平均 COP 高达 5.7 以上; 但没有考虑实际运行过程中膨胀阀进行过热度调节的动态特性
董科枫[12]	R22 辐照度 800w/m <sup>2</sup> , 环境温度 32.5℃ COP 可以达到 3.06~5.61, 但光伏集热板面积偏小
蒋澄阳[13]	R290 辐照度 920 w/m <sup>2</sup> , 环境温度 28℃ 光电转换效率高达 15.5%, 热泵平均 COP 可达 4.3, 但应做更多的测试数据保证可行性
马晓丰[14]	模拟辐照度 1000 w/m <sup>2</sup> , 环境温度 25℃ 全年平均光电效率为 13.36%, 但缺少实验论证
荆树春[17]	模拟制冷量 600~800 w, 辐射强度 700 w/m <sup>2</sup> 在压缩机的选择上给出了方向, 但缺少实验进行和模拟结果的比对
Zhou jinzhi [18]	R410A 辐照度 1000 w/m <sup>2</sup> , 环境温度 25℃ 光伏平均热效率和总效率为 56.6%和 69.7%, 平均 COP 为 4.7. 但需综合考虑经济因素

东南大学徐国英等[11]于 2011 年通过仿真研究, 对比了两种集热结构的直膨式光伏热泵(如图 2), 常见的圆形铜管蛇形排列和多孔铝扁管排列, 结果表明多孔扁管平线流动集热结构的换热性能较好, 南京地区气候条件下月平均热泵 COP 在 4.23~5.54 之间。

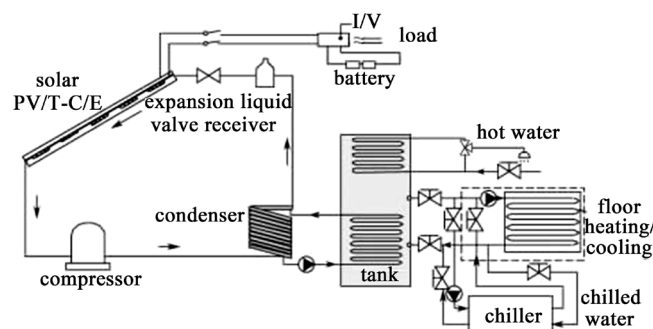


Figure 2. Building combined heat and power system based on photovoltaic heat pump  
图 2. 基于光伏热泵的建筑热电联供系统

东南大学董科枫等[12]设计的光伏太阳能热泵热水器综合性能良好,根据在不同的工作条件测量的数据,当天气晴朗或多云时,系统供水量为 150 L/50℃的生活热水的 COP 在 3.06 至 5.61 之间。在阴天时 COP 可以达到 2.68。

上海交通大学蒋澄阳[13]搭建了光伏热泵热水器试验台并用 R290 用作制冷剂进行相关实验研究,根据实验结果显示,实验系统的光电效率最高可达 15.5%,集热效率在 0.45 到 0.77 之间,并从中发现冷凝器的供水温度会极大影响热泵的 COP,随着供水温度的不断提升,热泵的 COP 不断下降,同时太阳辐照和环境温度对热泵 COP 有着正面影响,当一箱水从 14.8℃加热至 50.6℃时,热泵的平均 COP 可以达到 4.3,光电转换效率和 COP 的相对测量误差分别为 5%和 5.2%。

青岛理工大学的马晓丰等[14]通过对光伏热泵的热电性能进行模拟研究(如图 3),通过全年的运行模拟,得到系统的平均光电转换效率为 0.1336,在相同气象参数条件下,相比单一光伏系统提升 24.9%;相比单一土壤源热泵系统,热泵机组 COP 提了 10.4%。

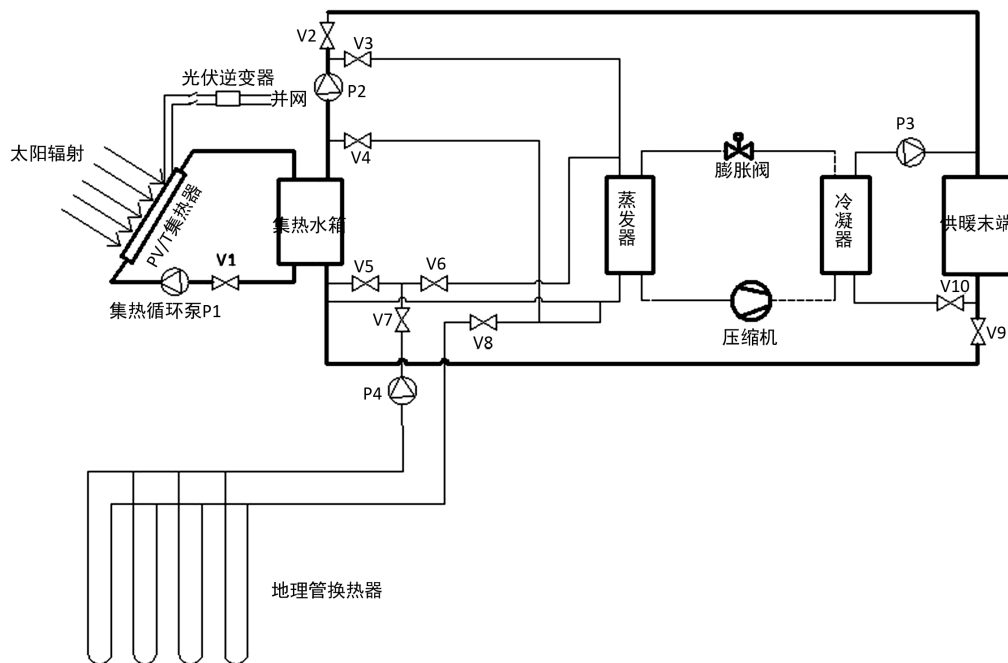


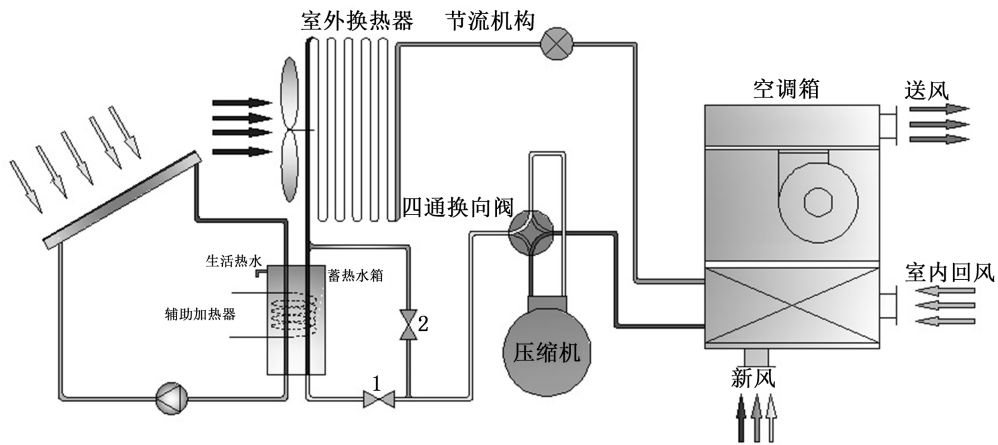
Figure 3. Schematic diagram of solar photovoltaic heat pump system

图 3. 太阳能光伏光热-热泵系统原理图

上海理工大学的刘鹏等[15]人经过实验研究,设计了一套整体效率为 4.86 的光伏双热源热泵系统(如图 4),显著提高了光电效率,降低了运行成本,具有很高的市场推广潜力。

Floschuetz [16]对 Hottel-Whillier 分析方程进行了优化,将光伏系统的性能系数与热迁移率与常规集热器进行比较,为光伏系统的性能分析提供了宝贵的意见。上海电力学院荆树春[17]在此基础上改进了 Hottel-Whillier 模型,结合热泵循环理论,对制冷剂流量、辐射强度和水箱水温等进行建模,研究其对光伏电池温度、蒸发温度和 COP 的影响,提出在以供热为主要目的的情况下,应选择较大的压缩机。

jinzhizhou [18]利用太阳能驱动的直接膨胀热泵系统成功地开发了一种新型平行铺设的光伏/微通道蒸发模块,以加热 150 m<sup>2</sup>的平板。此外,热泵系统的蒸发器也与建筑屋顶集成在一起,引入了光伏屋顶的概念。分析了不同参数对光伏屋顶性能的影响,并从理论上比较了光伏热泵和太阳能热泵系统的电效率和热效率。

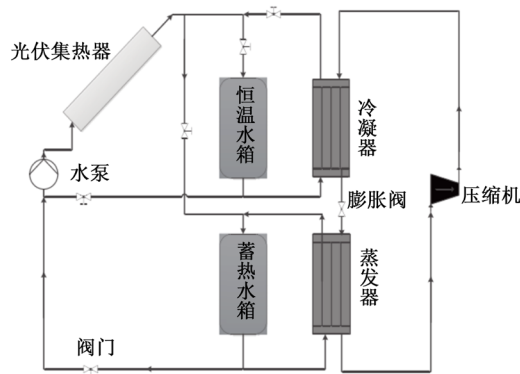


**Figure 4.** Direct expansion photovoltaic dual heat source heat pump system  
**图 4.** 直膨式光伏双热源热泵系统

以上研究表明：1) 直膨式光伏热泵既提高了 PV/T 系统中的光电、光热的综合利用效率，又把热泵循环巧妙的结合到了一起，提升了热泵的综合性能。2) 光伏电池和蒸发器的组合使得 PV 蒸发器表面温度低于传统的光伏电池和集热器温度，太阳的辐照强度使得热泵循环中热量的品位有所提升，改善了结霜的问题。

### 3. 间膨式光伏热泵系统

相比于直膨式光伏热泵，间膨式光伏热泵(图 5)是在光伏组件和蒸发器之间加上循环冷却系统，使得热泵蒸发器不和光伏组件直接耦合，而是通过循环冷却系统将两者间接联系起来，制冷剂不直接通过 PV/T 集器，利用储能工质来吸收能量，既继承了热泵应用的优点，同时解决了直膨式光伏热泵中光热与光伏面积匹配难，热泵工质压损大易泄露缺点。近年来间膨式光伏热泵受到了国内外学者广泛的关注，并在这方面做出了许多创新型的成果(见表 2)。



**Figure 5.** Figure of expandable photovoltaic heat pump system  
**图 5.** 间膨式光伏热泵系统图

**Table 2.** Research results of expandable photovoltaic heat pump  
**表 2.** 间膨式光伏热泵研究成果

研究者研究方法系统连接方式研究成果	
郭千朋[20]	实验、模拟串联、并联、混联光电转换效率平均提高 16.4%，平均电池温度可降低 20°C

Continued

张露 [21]	模拟混联热泵平均 COP 可达 4.7, 光伏热泵系统整体效率高达 74.4%
Vallati [22]	实验、模拟串联光伏热泵提供的热量可满足 70% 的供暖需求
Yang Liu [23]	实验、模拟串联光电转换效率高达 15.2%, 峰值热效率高达 86.7%
Bai [24]	模拟混联热泵 COP 可达 4.1, 与常规供热系统相比, 节能率高达 67%
Kim [25]	模拟串联、并联在相比传统的热泵系统, 光伏热泵系统的 COP 提高了 5.1%
Calise [26]	模拟混联 PV/T 的总效能为 49%, 热泵制热模式的年性能系数大于 4
Obanlege [27]	实验、模拟混联流量和水箱容积的变化的热泵 COP 的影响可以忽略不计
Zhou jinzhi [28]	实验、模拟串联为经济分析提供了基础数据和未来的改进方向
Amo [29]	实验、模拟混联热泵所需电力的 67.6% 由光伏系统提供, 具有可投资性

西安科技大学利用 TRNSYS 软件对西安地区的-系统进行了串并联模型的动态特性模拟。从这份报告中可以明显看出, 串行模式在冬季的性能优于并行模式[19]。上海理工大学郭千朋等人[20]对不同模式的光伏热泵系统(PV/T-SAHP)进行了实验研究, 系统设计了串联、混联和传统光伏系统三种模式(如图 6-8), 不同运行模式的实验结果表明, 与传统光伏系统相比, 光伏系统的光电转换效率平均提高了 16.4%, 每日平均输出功率最高可增加 14.5%, 电池温度最大可降低 20℃, 在获得同样加热量下系统按混联运行模式比按串联运行模式多输出 1.7 kW/h 的净发电量, 且与直膨式光伏热泵相比, 间膨式光伏泵系统具有更强的稳定性。

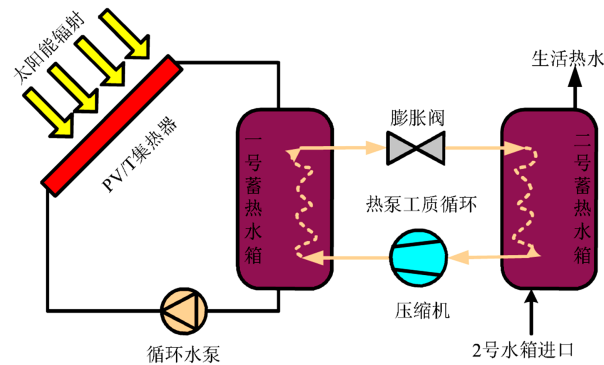


Figure 6. Series photovoltaic heat pump  
图 6. 串联式光伏热泵

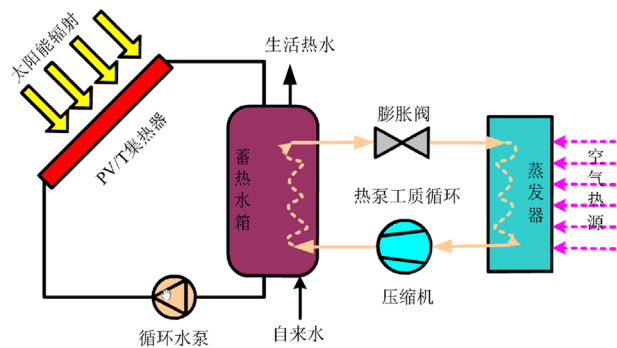


Figure 7. Parallel photovoltaic heat pump  
图 7. 并联式光伏热泵



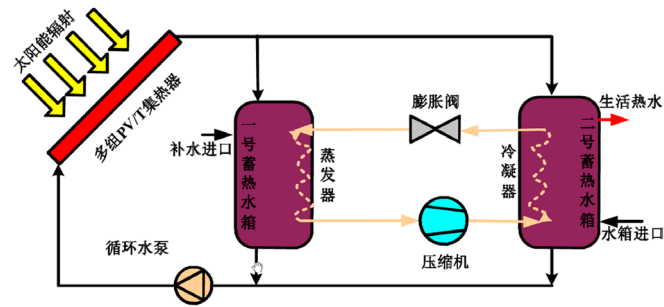


Figure 8. Hybrid photovoltaic heat pump  
图 8. 混联式光伏热泵

上海交通大学的张露[21]等人建立了太阳能光伏组件的间接热泵热水系统实验平台(图 9), 对光伏热泵系统在不同环境温度和辐照条件下的光电性能进行了现场测试和分析, 结果表明, PV/T 部分的发电比传统光伏组件增加了 11.0%, 相比传统光伏组件, 光伏热泵系统中的电池组件温度平均可降低 25.5℃, 使光伏电池寿命得到了有效的缓解。热泵机组的平均 COP 可达 4.7。光伏/热电热泵系统的整体光伏热效率高达 74.4%, 在产热和发电性能方面比传统集热器和光伏组件更具优势。

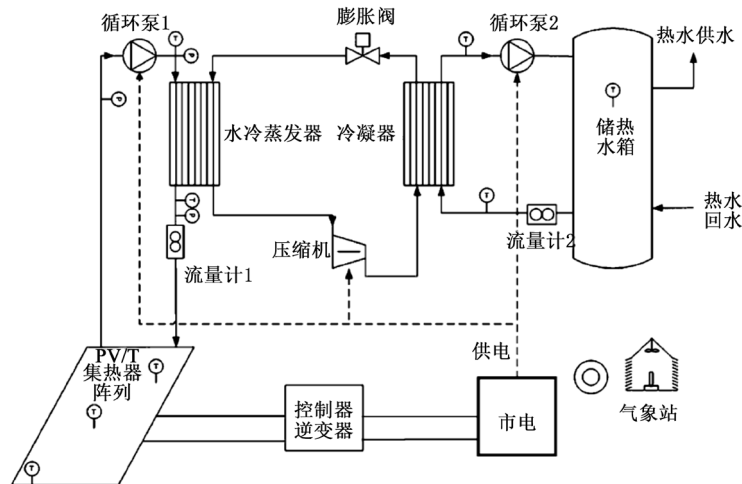


Figure 9. Figure of expandable photovoltaic heat pump system  
图 9. 间膨式光伏热泵系统图

Vallati 等人[22]分析了间接膨胀热泵系统的理论, 其中光伏/热电收集器被用作热泵系统的热源。比较了不同操作条件下系统的性能。结果表明, 系统的供暖效果受天气条件影响较大, 在高太阳辐射和室外空气温度下运行时, 系统提供的热量可满足 70% 的供暖需求。

华北电力大学[23]进行了基于太阳能低聚光光伏/集热器的间接膨胀热泵系统的实验研究, 最大光电转换效率高达 15.2%, 平均为 9.4%。此外, 峰值热效率高达 86.7%, 平均为 54.8%。

Bai 等人[24]从理论上分析了间膨式光伏/系统在 TRNSYS 环境中的性能。用 TRNSYS 16 计算环境对整个系统进行建模, 并根据全年的仿真结果对能量性能进行评估。结果表明, 在香港亚热带气候条件下, 该系统的 COP 可达 4.1, 与常规供热系统相比, 节能率高达 67%。

Kim 等人[25]基于两种不同类型的太阳能间接膨胀热泵系统, 比较了一年中每小时的瞬时能效。串联式太阳能热泵在一年内最差时为 3509 小时, 而采用新型太阳能集热器的太阳能热泵可达 7036 小时。地源也可稳定持续地为热泵提供能量其 COP 比传统平板太阳能集热器提高了 5.1%。

Calise 等人[26]利用 TRNSYS 软件提出了一个动态模型,并在同年对一个光伏/热电多联产系统进行了热经济分析。针对不同天气条件下的不同案例研究进行了为期 1 年的动态模拟。在不同的时间基础上对结果进行分析,给出能量、环境和经济性能数据。最后,进行了灵敏度分析和热经济学优化,以确定最小化简单偿还期的系统设计/控制参数集。结果表明, PV/T 的总能效为 49%,热泵制热模式的年性能系数大于 4,吸附式制冷机的性能系数为 0.55。最后还得出结论,系统性能对 PV/T 场区高度敏感。当考虑 50%的资本投资补贴时,该系统具有较为可观的收益。

Obalanlege 等人[27]介绍了一种间膨式光伏热泵系统(图 10),研究了直接影响间膨式热泵系统 COP 的两个参数:流量和水箱容积的变化。并采用热力学和传热分析方法,研究了光伏-热泵混合系统的热电性能特性。随着增加太阳辐射强度从( $250 \text{ W/m}^2$  增加到  $1000 \text{ W/m}^2$ )使系统的综合 COP 提高了 1.2,而对热泵的综合 COP 的影响可以忽略不计。将水箱尺寸从 1 升增加到 100 升, PV/T 的电效率和(总电和热)效率分别增加了 0.36%和 6.1%。储罐尺寸的变化对热泵或整体光伏热泵系统的 COP 的影响可以忽略不计。(图 11, 图 12)当 PV/T 流速从 3 升/分钟(管道中的层流)增加到(17 升/分钟)湍流时 PVT 的电、热和总效率分别增加 0.25%、3.0%和 3.25%,而对热泵或系统的综合 COP 没有显著影响。

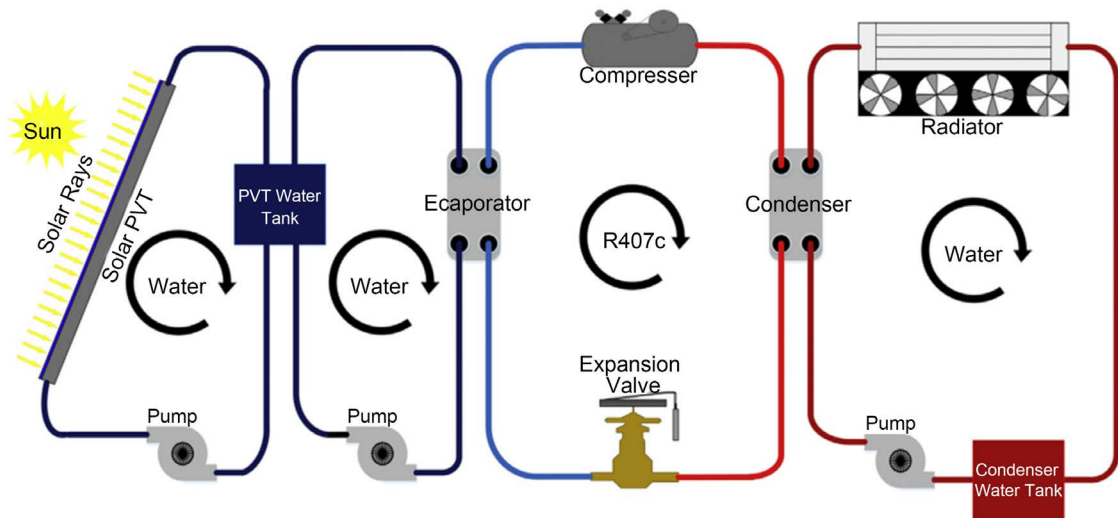


Figure 10. Expansion PV heat pump system layout

图 10. 间膨式光伏热泵系统布局

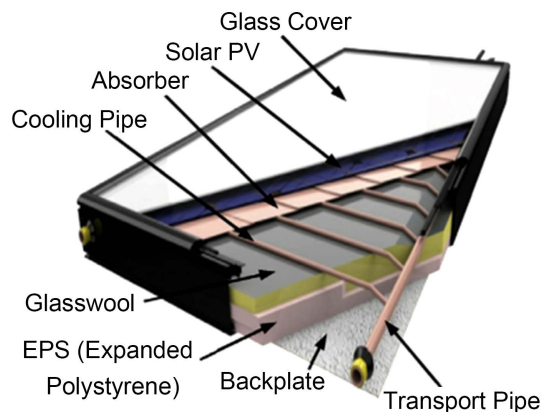


Figure 11. PV/T pipeline arrangement diagram

图 11. 球 PV/T 管道排列图



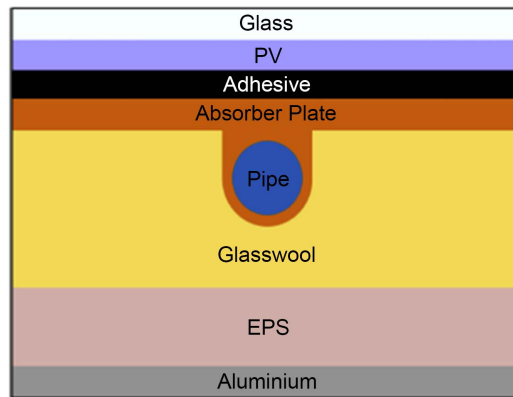


Figure 12. Layered diagram of PV/T inner tube  
图 12. PV/T 内管分层图

Zhou 等人[28]还提出了一个基于微通道的间接式光伏热泵系统的理论模型(图 13)。此外,通过实验研究验证了模型的准确性。该热泵的创新之处在于采用了微间的空气间隙。这表明有必要减少面板前部的热量损失,以提高整体效率。仿真模型得到了实验结果的验证,为预测系统的季节性性能提供了一种合理的方法,为经济分析提供了基础数据和未来的改进方向。微通道结构作为太阳能热交换器和光伏板的热交换器,提高了太阳能板内部工作流体的传热速率和能效。与微通道光伏板相比,微通道热板具有更高的整体效率,这得益于玻璃罩和吸收器之间的空气间隙。这表明有必要减少面板前部的热量损失,以提高整体效率。仿真模型得到了实验结果的验证,为预测系统的季节性性能提供了一种合理的方法,为经济分析提供了基础数据和未来的改进方向。

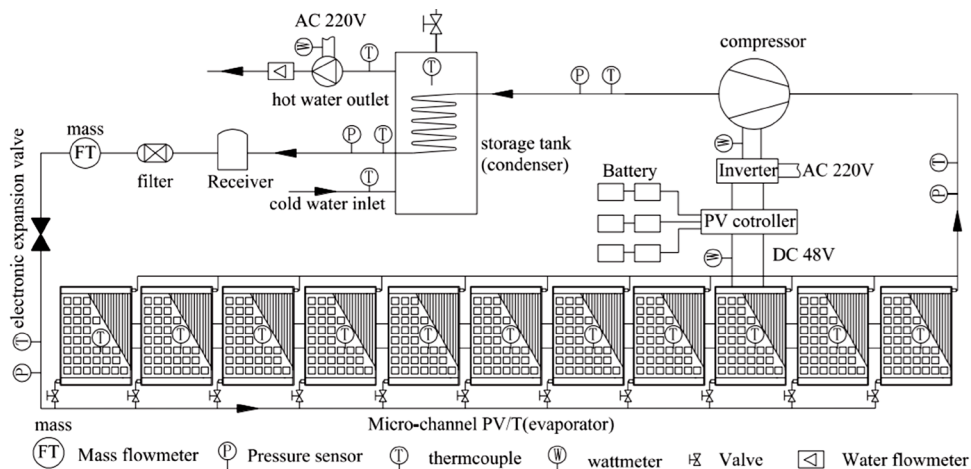


Figure 13. Microchannel solar indirect expansion photovoltaic heat pump system  
图 13. 微通道太阳能间接膨胀光伏热泵系统

Amo 等人[29]提出了一种在热需求较大的建筑中节约能源和经济的简便技术方案。它由一个与 PV/T 太阳能场耦合的热泵组成,由 TRNSYS 模拟,并通过实验验证工作的最终目标是分析太阳能场、储存(水箱)和热泵加热功率的最合适大小,以优化系统效率。结果表明,工作冷温范围为  $10^{\circ}\text{C}\sim 20^{\circ}\text{C}$  时 COP 上升到 4.62,而在  $7^{\circ}\text{C}\sim 10^{\circ}\text{C}$  之间工作时 COP 为 2.96。热泵所需电力的 67.6% 由光伏生产提供(热泵所需的 13771 千瓦时中,9309 千瓦时/年是可再生的)。经济分析表明投资回收期约为 6 年,这使得该方案极具吸引力。

以上研究表明, 1) 间膨式光伏热泵很好的解决了光伏与光热面积的匹配问题; 2) 系统灵活性较高, 光伏电池能够得到更好的冷却效果; 3) 热泵蒸发器与光伏组件不直接耦合解决了占地面积较大的问题, 同时可以减少压损, 从而提高了热泵的性能。

#### 4. 带喷射器的 CO<sub>2</sub> 间膨式光伏热泵

光伏热泵虽然有很大的市场前景, 但根据《蒙特利尔议定书》, 热泵中的 CFCs 类制冷剂已被禁止使用, 对于发达国家, HCFCs 类制冷剂也会在 2020 年完全停用, 为了保护我们赖以生存的环境, 寻求替代 CFCs、HCFCs 工质已成为全球为之共同努力的问题, 这使得自然工质特别是 CO<sub>2</sub> 重新受到重视。CO<sub>2</sub> 有着众多优点: ODP 为 0, GWP 为 1; 安全性和稳定性高; 成本低, 易于回收; 不与润滑油发生反应。与传统循环相比, 跨临界 CO<sub>2</sub> 循环的放热过程处于超临界状态, 工质无相变, 换热器是气体冷却器而不是冷凝器, 放热过程温度滑移大, 压缩比小, 绝热效率以及压缩机的效率高[30]。因此, CO<sub>2</sub> 很适合应用于热泵然而, 热力问题是制约 CO<sub>2</sub> 热泵热水器发展的重要问题之一。CO<sub>2</sub> 跨临界循环中的节流膨胀被研究人员广泛认为是造成能量损失的主要环节。研究表明, 理想的膨胀机能够起到提高系统性能 45%~75% 的效果。所以, 采用一些膨胀机构来减少节流损失已成为许多学者研究的热点, 其中应用喷射器回收热量和能量的制冷系统因其有助于提升系统性能受到越来越多的青睐, 并将成为 CO<sub>2</sub> 热泵热水器技术发展的重要领域之一。早期的蒸汽引射制冷循环中最主要的是采用工业废热和余热完成二次利用来进行冷量的制取, 后来经过学者们的持续改进又逐步发展出太阳能引射制冷循环、吸收引射符合制冷循环等多种形式混合的制冷循环系统, 通过回收低品位热源的热量作为制冷系统的动力之源。把喷射器引入到常规的蒸汽压缩制冷循环中, 形成的蒸汽压缩引射制冷循环系统, 会使循环中的膨胀过程由等焓变为等熵进而回收压力能和提升系统循环效率。基于此本文创新性的提出一种新型带喷射器的 CO<sub>2</sub> 间膨式光伏热泵系统(如图 14)。

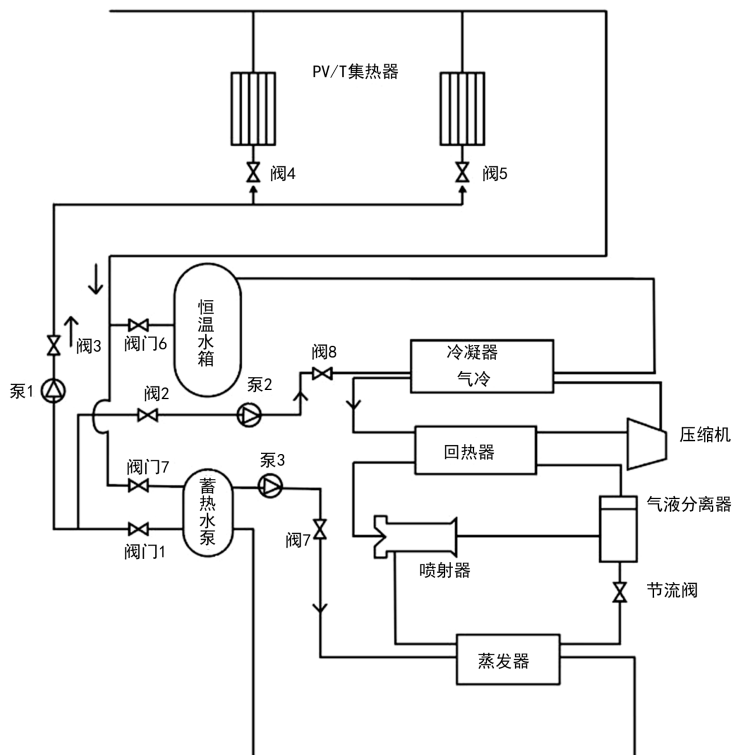


Figure 14. Diagram of CO<sub>2</sub> interexpansion photovoltaic heat pump system with injector  
图 14. 带喷射器的 CO<sub>2</sub> 间膨式光伏热泵系统图

系统运行原理: PV/T 集热器接收太阳辐射, 并将其中的短波部分转换为电能输出, 同时把其它长波部分太阳辐射转换为热能, 被冷却水带走, 进入蓄热水箱作为热泵蒸发器的低温热源, 不论热泵系统是否可以运行, PV/T 集热器都可以进行高效的光电转换。热泵系统运行时, 制冷剂在蒸发器中完全蒸发, 变成过热蒸汽, 压缩机吸入过热蒸汽后, 压缩升压, 工质变为高温高压的  $\text{CO}_2$  气体, 进入气冷器中等压放热, 冷凝成过冷液体。冷凝器另一侧的水被工质放出的热量加热后, 进入恒温水箱, 供给用户使用。工作流体进入到喷射器中, 工作流体在通过喷嘴后, 速度增加, 压力降低, 形成超音速流动, 在喷嘴出口处周围形成负压环境。从蒸发器中完成蒸发吸热的低压低速  $\text{CO}_2$  气体将作为引射流体, 在工作流体高速射流的卷吸作用下被吸入喷射器的吸收室中, 之后工作流体和引射流体开始进行混合, 完成能量、质量的交换其压力和速度并不断趋于均匀, 再经扩压室减速增压后流出, 之后流入到气液分离器中。在气液分离器的作用下将饱和的  $\text{CO}_2$  蒸汽送入压缩机中, 而饱和的  $\text{CO}_2$  液体送进节流阀需要完成等焓节流降压过程, 使压力降到工况要求的蒸发压力后再送入蒸发器中, 然后在蒸发器中完成蒸发换热过程制取冷量后作为引射流体再次流入到喷射器中, 从而完成整个系统的循环过程。并且液态的工质将来自蓄热水箱的热水冷却降温供给 PV/T 集热器用来冷却太阳能光伏电池。一方面, 由于蓄热水箱中储有 PV/T 集热器收集的太阳能, 使其温度高于环境温度, 这样使得蒸发器吸热更容易, 从而可以得到更高的蒸发温度, 提高了热泵的效率。另一方面, 从热泵蒸发器中出来的冷冻水被泵送入 PV/T 集热中去冷却太阳能电池组件, 降低了太阳能电池的温度, 提高了它的发电效率。而且有热泵冷凝器可以把水温提升到比 PV/T 集热器更高的温度, 能满足人们对高水温的需求。

综上带喷射器的  $\text{CO}_2$  间膨式光伏热泵具有以下三个优势: 一是与传统空气源热泵相比热泵的低温热源来自太阳能电池板的自身发热回收了这部分废热, 从而提高了太阳能的综合利用效率, 另外这部分热量品位较一般空气源高, 使得热泵蒸发温度高于空气源热泵因此可提高热泵性能系数; 二是从热泵蒸发器中出来的冷冻水被泵送入 PV/T 集热中去冷却太阳能电池组件, 降低了太阳能电池的温度, 提高了它的发电效率。三是能提高压缩机的吸入压力, 这样能降低压比, 从而提高系统的 COP。由以上可知带喷射器的  $\text{CO}_2$  光伏热泵系统符合国家提倡的节能减排方针政策。

## 5. 结论

1) 光伏热泵系统的应用为能源的综合利用提供了新的方向, 目前国内对间膨式光伏热泵研究较少, 技术还不太成熟, 应加大光伏热泵方面的优化研究, 拓宽光伏光热综合利用技术与热泵技术的应用方向, 提升光电转换效率以及热泵的综合性能。

2) 受经纬度影响, 各地域的太阳辐照度不同所以对制冷剂的选取各有不同, 由于  $\text{CO}_2$  具有高排气温度和较宽的温度滑移特性且为环境友好型制冷剂, 所以日后在制冷剂方面应从环境角度考虑, 加大  $\text{CO}_2$  制冷剂的研究。

3) 间膨式光伏热泵投资性较高, 是限制其发展的主要原因之一, 利用喷射器代替节流阀可以提高压缩机的吸气压力, 减少压比提升热泵的性能从而可以有效地节约成本。在未来应该综合考虑光伏热泵的综合效率与经济性能, 并不断提高运行的可靠性, 为未来发展和用户选择提供新方向。

## 参考文献

- [1] 陈欢. 自然循环太阳能蒸汽发生系统传热特性实验研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [2] 沈义. 我国太阳能的空间分布及地区开发利用综合潜力评价[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2014.
- [3] 2015-2020 年中国太阳能热水器行业分析与发展趋势研究报告[Z].
- [4] 何汉峰. 光伏太阳能热泵的动态分布参数模拟与实验研究[D]: [博士学位论文]. 合肥: 中国科学技术大学, 2008.

- [5] Chaturvedi, S.K. and Shen, J.Y. (1984) Thermal Performance of a Direct Expansion Solar-Assisted Heat Pump. *Solar Energy*, **33**, 155-162. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(84\)90233-0](https://doi.org/10.1016/0038-092X(84)90233-0)
- [6] Gagliano, A., Tina, G.M., Aneli, S. and Nizetic, S. (2019) Comparative Assessments of the Performance of PV/T and Conventional Solar Plants. *Journal of Cleaner Production*, **219**, 304-315. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.038>
- [7] Ito, S., Miura, N., Wang, J.Q., *et al.* (1997) Heat Pump Using a Solar Collector with Photovoltaic Modules on the Surface. *Journal of Solar Energy Engineering*, **119**, 147-151. <https://doi.org/10.1115/1.2887894>
- [8] 裴刚, 季杰, 等. 光伏太阳能热泵在不同冷凝水温下的特性[J]. 太阳能学报, 2006, 36(10): 1044-1050.
- [9] 裴刚. 光伏-太阳能热泵系统及多功能热泵系统的综合性能研究[D]: [博士学位论文]. 合肥: 中国科学技术大学, 2006.
- [10] Chow, T.T., Fong, K.F., Pei, G., *et al.* (2010) Potential Use of Photovoltaic—Integrated Solar Heat Pump System in Hong Kong. *Applied Thermal Engineering*, **30**, 1066-1072. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2010.01.013>
- [11] 徐国英. 太阳能光伏/光热一体化热泵系统及实验研究[D]: [博士学位论文]. 南京: 东南大学, 2012.
- [12] 董科枫. 光伏太阳能热泵的结构优化和变容量控制研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 东南大学, 2017.
- [13] 蒋澄阳. R290 太阳能光伏光热一体化热泵热水器系统性能研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2018.
- [14] 马晓丰. 太阳能光伏光热-热泵系统动态模拟及优化研究[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 青岛理工大学, 2018.
- [15] 刘鹏, 穆志君, 等. 太阳能热泵技术在国内的研究与发展[J]. 化工进展, 2009(28): 331-332.
- [16] Floschuetz, L.W. (1979) Extension of the Hottel-Whillier Model to the Analysis of Combined Photovoltaic/Thermal Flat Plat Collectors. *Solar Energy*, **22**, 361-366.
- [17] 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.
- [18] Zhou, J.Z., Zhao, X.D., Ma, X.L., Qiu, Z.Z., Ji, J., Du, Z.Y. and Yu, M. (2016) Experimental Investigation of a Solar Driven Direct-Expansion Heat Pump System Employing the Novel PV/Micro-Channels-Evaporator Modules. *Applied Energy*, **178**, 484-495. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.06.063>
- [19] Huan, C., Wang, F., Li, S., Zhao, Y., Liu, L., Wang, Z. and Ji, C. (2019) A Performance Comparison of Serial and Parallel Solar-Assisted Heat Pump Heating Systems in Xi'an, China. *Energy Science & Engineering*, **7**, 1379-1393. <https://doi.org/10.1002/ese3.357>
- [20] 郭千朋, 关欣, 夏国青, 等. PV/T-SAHP 系统实验研究[J]. 太阳能学报, 2017, 38(7): 1822-1827.
- [21] 张露. 太阳能光伏光热(PV/T)热泵热水系统实验研究[J]. 建筑科学, 2019, 35(2): 63-66.
- [22] Vallati, A., Oclon, P., Colucci, C., Mauri, L., de LietoVollaro, R. and Taler, J. (2019) Energy Analysis of a Thermal System Composed by a Heat Pump Coupled with a PV/T Solar Collector. *Energy*, **174**, 91-96. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.02.152>
- [23] Liu, Y., Zhang, H. and Chen, H.P. (2020) Experimental Study of an Indirect-Expansion Heat Pump System Based on Solar-Low-Concentrating Photovoltaic/Thermal Collectors. *Renewable Energy*, **157**, 718-730. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.05.090>
- [24] Bai, Y., Chow, T.T., Menezo, C. and Dupeyrat, P. (2012) Analysis of a Hybrid PV/Thermal Solar-Assisted Heat Pump System for Sports Center Water Heating Application. *International Journal of Photoenergy*, **2012**, Article ID: 265838. <https://doi.org/10.1155/2012/265838>
- [25] Kim, T., Choi, B., Han, Y.S. and Do, K.H. (2018) A Comparative Investigation of Solar-Assisted Heat Pumps with Solar Thermal Collectors for a Hot Water Supply System. *Energy Conversion and Management*, **172**, 472-484. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.07.035>
- [26] Calise, F., Dented'Accadia, M., Figaj, R.D. and Vanoli, L. (2016) A Novel Solar-Assisted Heat Pump Driven by Photovoltaic/Thermal Collectors: Dynamic Simulation and Thermoeconomic Optimization. *Energy*, **95**, 346-366. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.11.071>
- [27] Obalanlege, M.A., Mahmoudi, Y., Douglas, R., Ebrahimmia-Bajestan, E., Davidson, J. and Bailie, D. (2019) Performance Assessment of a Hybrid Photovoltaic-Thermal and Heat Pump System for Solar Heating and Electricity. *Renewable Energy*, **48**, 558-572.
- [28] Zhou, J., Zhu, Z., Zhao, X., Yuan, Y., Fan, Y. and Myers, S. (2019) Theoretical and Experimental Study of a Novel Solar Indirect-Expansion Heat Pump System Employing Minichannel PV/T and Thermal Panels. *Renewable Energy*, **151**, 674-686. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.11.054>
- [29] DelAmo, A., Martínez-Gracia, A., Bayod-Rújula, A.A. and Canada, M. (2019) Performance Analysis and Experimen-

---

tal Validation of a Solar-Assisted Heat Pump Fed by Photovoltaic-Thermal Collectors. *Energy*, **169**, 1214-1223.  
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.12.117>

- [30] 李伟, 葛文凯, 庄长宇, 等. 太阳能热泵热水器低温性能研究[J]. 家电科技, 2019(1): 82-84.