

# 基于光伏光热一体化太阳能热泵系统运行策略优化

王 刚 史娇阳 魏 岩 罗 洋

**摘 要:** 随着全球能源需求的不断增长和环境问题的日益严峻,寻找高效、清洁、可持续的能源利用方式已成为人类社会发展的迫切需求。太阳能作为一种取之不尽、用之不竭的可再生能源,因其清洁、环保、分布广泛等优点,成为解决能源危机和环境污染的重要途径。而在太阳能利用技术中,光伏发电(Photovoltaic, PV)和太阳能热利用(Solar Thermal, ST)是两大主要技术路径。然而,传统的光伏发电和太阳能热利用系统往往存在资源利用率低、能源转换效率不足等问题,限制了其大规模应用。本研究旨在针对光伏光热一体化太阳能热泵系统的运行特性进行深入分析,探索其在不同工况下的优化策略,以期为系统的实际应用提供理论支持和技术参考。

**关键词:** 光伏光热一体化; 太阳能热泵; 系统运行; 优化策略

## 引言

随着全球能源需求的增长和化石燃料的逐渐枯竭,能源危机和环境污染问题已成为制约社会发展的主要瓶颈。太阳能作为一种绿色、可持续的能源形式,具有广阔的应用前景。然而,传统的太阳能利用技术在实际应用中仍存在诸多限制:例如,光伏发电系统在阴天或光照不足的情况下效率显著下降;太阳能热利用系统受天气条件和环境温度的影响较大,难以满足全天候稳定运行的需求。在此背景下,光伏光热一体化(PV-T)系统作为一种新型的太阳能利用技术,通过在同一集热器上实现太阳能的光电和光热转换,能够更高效地利用太阳能资源。

## 一、光伏光热一体化太阳能热泵系统概述

光伏光热一体化太阳能热泵系统是一种结合了光伏发电、太阳能热利用和热泵技术的高效能源利用系统。该系统通过在同一集热器上同时实现太阳能的光电和光

热转换,能够更高效地利用太阳能资源。在这一系统中,光伏电池将太阳光转化为电能,而集热器则吸收太阳辐射并收集热量。随后,热泵系统利用这些电能和热量,将低位热源中的热量转移到高位热源中,从而实现高效的供暖或热水供应。(见图1)

这种系统的优势在于能够同时利用太阳能的两种能量形式——光能和热能,从而提高了整体能源利用效率。此外,光伏光热一体化系统相较于单独的光伏发电或太阳能热利用系统,具有更高的运行稳定性和适应性,能够在不同天气条件下保持较高的效率。然而,该系统也存在一些挑战,例如初始投资较高、系统复杂性增加以及对精确控制和协调的需求。

系统的运行受到多种因素的影响,包括天气条件、环境温度、负荷变化等。因此,优化系统的运行策略以提高其整体性能和效率显得尤为重要。后续研究将聚焦于分析系统运行特性,探索优化策略,以实现更高效、稳定的能源利用。

## 二、光伏光热一体化太阳能热泵系统运行特性分析

### 1. 系统工作原理及能量流动分析

光伏光热一体化太阳能热泵系统的运行涉及复杂的能量转化与传递过程。系统中,光伏组件首先将太阳辐射能转化为电能,这部分电能用于驱动热泵系统的运行,包括压缩机和循环泵等关键部件。同时,集热器吸收太阳辐射热量,这部分热量通过热交换传递至热泵的蒸发器,提升蒸发器中的制冷剂温度,从而启动热泵的工作循环。压缩机将低温低压的制冷剂压缩为高温高压气体,通过冷凝器将热量传递到需求侧,如供暖或热水供应。整个过程中,系统的能量流动经历了从光能到电能的转

## 作者简介:

- 1.王刚(1976.08——)男,汉族,本科学历,高级工程师,主要从事清洁能源供暖供氧设计及技术研究相关工作。
- 2.史娇阳(1985.11——)女,汉族,本科学历,中级工程师,主要从事市政热力、清洁能源供暖设计工作。
- 3.魏岩(1990.05——)女,汉族,本科学历,中级工程师,主要从事热力方面的研究工作。
- 4.罗洋(1986.10——)男,汉族,大专学历,中级工程师,主要从事项目管理方面的工作。

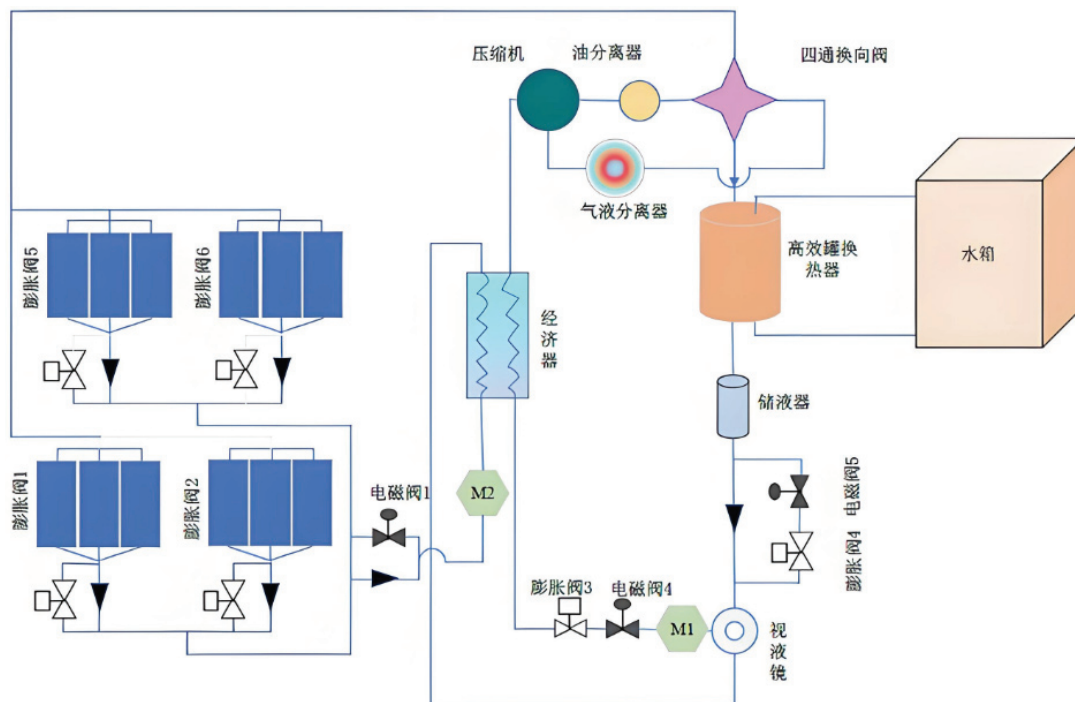


图1 光伏光热系统

换，再到热能的高效利用。此外，系统中还设置了回热装置，用于回收压缩机排气的余热，进一步提升能源利用效率。这种多级的能量转化和优化传递，使得光伏光热一体化太阳能热泵系统能够在不同工况下实现高效率的能源利用。通过协调光伏组件、集热器和热泵系统的工作状态，系统能够根据实际需求动态调整能量分配，确保最优的运行性能。

## 2. 系统运行中的热力性能分析

光伏光热一体化太阳能热泵系统的热力性能分析聚焦于系统在能量转换与传递过程中的效率与稳定性。系统的核心热力学指标包括热泵性能系数（COP）、光伏组件的光电转换效率以及集热器的热效率，三者共同决定了系统的整体能效。太阳辐射强度和环境温度的变化直接影响光伏组件的发电效率与集热器的热输出，进而影响热泵的蒸发温度与冷凝温度，导致COP的动态波动。制冷剂的物理性质、循环流量以及蒸发器与冷凝器的传热效率同样对系统热力性能产生显著影响。此外，系统的热损失主要来源于光伏组件的工作温升和集热器的散热，高温环境下光伏效率的衰减会进一步降低系统的综合性能。通过优化热泵循环参数、调整制冷剂流量或引入相变材料缓冲温度波动，可有效提升系统的热力性能。实验与仿真研究表明，动态匹配光伏发电功率与热泵负荷需求是实现高效运行的关键，而多参数协同控制策略能够

显著减少能量损失，确保系统在不同工况下的稳定输出。

## 3. 系统在不同工况下的运行特性

光伏光热一体化太阳能热泵系统的运行特性在不同工况下表现出显著差异，这些特性主要受环境条件和负荷需求的影响。在光照强度充足的情况下，光伏组件能够提供足够的电能输出，同时集热器吸收的热量也显著增加，这为热泵系统的运行提供了充足的能源支持。然而，在光照不足或阴雨天气时，光伏组件的输出功率下降，系统可能会依赖外部电源或存储能源来维持热泵的运行，从而影响整体效率。此外，环境温度的变化也对系统性能产生重要影响，例如在高温环境下，光伏组件的效率会降低，且集热器的热量散失增加；而在低温环境下，热泵的制热效率下降，需要更高的输入能量来维持相同的输出。除此之外，系统负荷需求的变化也会影响其运行特性，例如在高负荷需求下，热泵需要更高的供热量，系统可能会优先利用集热器中的热量，同时增加光伏组件的输出功率以驱动热泵；而在低负荷需求下，系统可能会降低运行功率，以减少能源浪费并延长设备寿命。因此，系统的动态响应能力和不同工况下的能量平衡优化是实现高效运行的关键。

### 三、光伏光热一体化太阳能热泵系统运行优化策略

#### 1. 负荷需求与系统输出匹配优化

负荷需求与系统输出匹配优化是光伏光热一体化太

太阳能热泵系统高效运行的关键因素，其核心在于确保系统输出与用户的能源需求保持一致，从而提高能源利用效率并减少浪费。因此，需要采取多种优化手段。一是利用历史数据和机器学习算法，可以预测未来的负荷需求变化趋势，提前做好系统的运行调整，例如，预测到某段时间内负荷需求将增加，可以提前增加集热器的热吸收量或光伏组件的输出功率，以满足即将到来的需求高峰。二是根据实时负荷需求的变化，动态调整光伏组件的工作状态、集热器的热吸收量以及热泵系统的运行参数，例如，在负荷需求增加时，可以增加光伏组件的输出功率，或提高热泵系统的制热能力，以满足更高的需求；在需求降低时，则相应减少系统输出，节省能源。三是通过引入储热罐或蓄电池等设备，可以在负荷需求低谷期存储多余的能源，而在需求高峰期释放存储的能量，从而平衡系统输出与负荷需求的变化，这种方法特别适用于在光照充足的白天存储多余的太阳能，用于满足夜间较高的负荷需求。在负荷需求无法完全由光伏光热系统满足时，可以引入其他能源形式作为补充，例如电能或天然气。这种方法提高了系统的稳定性，确保在任何情况下都能满足用户的能源需求。

## 2. 基于EMF分析的系统效率优化

基于EMF分析的系统效率优化是一种高级的能量评估方法，主要用于提高光伏光热一体化太阳能热泵系统的整体能效。通过量化和分析系统中的能量损失，可以识别出效率瓶颈并制定相应的改进措施。在光伏光热一体化系统中，各子系统的能量转化和传递过程复杂，因此需要综合考虑多个因素，如光伏组件的转换效率、集热器的热效率、热泵系统的性能以及系统的热损失等。通过应用EMF分析，可以将各子系统的能量损失进行详细评估，并找出主要的能量损失环节。工程师可以根据这些分析结果，优化系统设计，例如改进热交换器的效率、提高光伏组件的散热性能或调整系统的运行参数，从而有效减少能量浪费，提高整体系统的能源利用效率。此外，基于EMF分析的优化策略还可以实现各子系统之间的协调工作，确保系统的高效运行。这种方法不仅有助于提升系统的性能，还能降低运行成本并减少对环境的影响，推动可持续能源技术的发展。

## 3. 光伏组件与热泵系统的协调控制策略

光伏组件与热泵系统的协调控制策略对于光伏光热一体化太阳能热泵系统的高效运行至关重要。该策略的

核心在于优化光伏组件输出的电能与热泵系统需求之间的匹配。通过实时监测光伏组件的输出功率和热泵系统的负荷需求，系统可以在不同条件下动态调整能量分配。

在光照充足的时段，光伏组件能够提供较高的电能输出。系统可以优先利用这些电能来驱动热泵，以减少对传统电网的依赖。同时，热泵可以根据实际需要调节制热或制冷能力，确保能源的高效利用。当光照不足时，系统可以切换至存储能源或外部电网，确保热泵系统的持续运行。

协调控制策略还包括对热泵运行参数的精细调节。例如，通过调整热泵压缩机的转速和制冷剂流量，系统可以在不同负荷需求下实现高效能源转换。此外，引入储热装置能够平衡光伏组件输出功率与热泵系统需求之间的差异。在光照充足时存储多余热量，在需求高峰时释放，减少能源浪费并提高系统的稳定性。

## 结束语

综上所述，负荷需求与系统输出的精准匹配、基于焓分析的效率优化以及光伏组件与热泵系统的协调控制是提升整体性能的关键策略。这些优化方法不仅能够提高系统的能源利用效率，还能降低运行成本并减少对环境的不利影响。未来的研究可以进一步优化系统的动态响应能力，探索更高效能量转换与传递技术，并结合人工智能和大数据分析等新兴技术，实现更智能、更精准的系统控制。

## 参考文献

- [1] 纪明达. 基于光伏光热一体化太阳能热泵系统运行策略优化[D]. 华北理工大学, 2023.
- [2] 叶爽, 张昕宇, 俞英鹤, 等. 太阳能光热光伏耦合空气源热泵系统清洁取暖应用减碳性能研究[J]. 建筑科学, 2024, 40(6): 10-16.
- [3] 向宇玥, 褚磊驰, 方元, 黄世芳, 刘剑, 张小松. 基于PV/T的双源热泵热水系统的实验研究[J]. 2024.
- [4] 朱开杨. 太阳能光伏光热耦合地源热泵系统性能模拟与优化研究[D]. 华北水利水电大学, 2024.
- [5] 刘文杰, 彭慈华, 姚剑, 等. 直膨式太阳能PVT热泵热水系统运行性能仿真与分析[J]. 中国电力, 2023, 56(3): 23-29. DOI: 10.11930/j.issn.1004-9649.202209105.