DOI: 10.19666/j.rlfd.202505124

太阳能全光谱分频利用系统光路优化及性能分析

张顺奇[1]，付康丽[1]，刘庆凡[2]，王英丞[1]，韩 伟[1]，王峰年[1]，
张可臻[1]，姚明宇[1]，敬登伟[2]
（1. 西安热工研究院有限公司，陕西 西安 710054；
2. 西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室，陕西 西安 710049）

［摘 要］【目的】太阳能光谱分频利用技术可实现太阳能的高效利用，提高基于线性菲涅尔透镜的太阳能全光谱分频利用系统的光学效率。【方法】利用 TracePro 软件搭建了光路分析模型，分析了光伏组件的安装方式对系统光学效率的影响，并研究了入射角的横向和纵向偏差对系统光学性能的影响。【结果】光路分析模型与试验结果的相对误差在 1%范围内，证明了模型的有效性；当光伏组件安装高度为 540 mm、夹角为 135°时，光伏组件表面能够获得最高的平均光分布均匀度 0.86，系统总光学效率 80.1%；当横向入射偏差角从 0°增至 3.0°时，系统的总体光学效率从 80.1%降至 67.1%，平均光分布均匀度从 0.86 降至 0.79；当纵向入射偏差角从 0°增到 30.0°时，系统的总体光学效率从 80.1%降至 26.4%，光分布均匀度从 0.86 降至 0.74。【结论】该结论可为太阳能全光谱分频利用系统的设计以及运行优化提供参考。

［关 键 词］太阳能；全光谱；纳米流体；光伏/光热系统；光路优化

［引用本文格式］张顺奇，付康丽，刘庆凡，等. 太阳能全光谱分频利用系统光路优化及性能分析[J]. 热力发电，2026，55(5)：42-50. ZHANG Shunqi, FU Kangli, LIU Qingfan, et al. Optical path optimization and performance analysis of solar full-spectrum utilization system based on beam splitter[J]. Thermal Power Generation, 2026, 55(5): 42-50.

Optical path optimization and performance analysis of solar full-spectrum utilization system based on beam splitter

ZHANG Shunqi[1], FU Kangli[1], LIU Qingfan[2], WANG Yingcheng[1], HAN Wei[1], WANG Fengnian[1], ZHANG Kezhen[1], YAO Mingyu[1], JING Dengwei[2]
(1. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China;
2. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: [Objective] Full-spectrum solar energy utilization through spectral splitting offers an effective pathway to improve overall solar energy conversion efficiency by allocating different wavelength bands to suitable energy conversion devices. Linear Fresnel lens-based systems are particularly attractive due to their structural simplicity and scalability. However, the optical efficiency and optical distribution uniformity of such systems are highly sensitive to structural parameters and tracking deviations. The objective of this study is to enhance the optical performance of a linear Fresnel lens-based full-spectrum solar splitting system by optimizing the installation configuration of the photovoltaic (PV) module and by systematically evaluating the influence of incident angle deviations on system performance. [Methods] An optical ray-tracing model of the proposed system was established using TracePro software. The model incorporated the geometric configuration of the linear Fresnel lens, spectral

收 稿 日 期：2025-05-20 修 回 日 期：2025-08-07 接 受 日 期：2025-08-19
基 金 项 目：国家重点研发计划项目（2024YFB2408400）；陕西省重点研发计划项目（2023-LL-QY-37）
Supported by: National Key Research and Development Program (2024YFB2408400); Key Research and Development Program of Shaanxi Province (2023-LL-QY-37)
第一作者简介：张顺奇（1995），男，博士，工程师，主要研究方向为太阳能高效利用技术，albertzsq@163.com。
通信作者简介：敬登伟（1977），男，博士，教授，主要研究方向为太阳能规模制氢、能源开采及转化过程多相流、仿生及光学流动控制技术，dwjing@xjtu.edu.cn。

splitting characteristics, PV module positioning, and reflective components. To ensure model reliability, a prototype system was constructed, and experimental measurements were conducted under controlled conditions. The simulation results were validated against experimental data by comparing optical efficiency values. Subsequently, a parametric study was performed to investigate the influence of PV module installation height and tilt angle on the optical distribution uniformity and total optical efficiency. In addition, the effects of lateral and longitudinal incident angle deviations, which represent practical solar tracking errors, were quantitatively analyzed. Key performance indicators included total optical efficiency and optical distribution uniformity on the PV surface. [Results] The comparison between simulation and experimental results showed a relative error within 1%, confirming the accuracy and validity of the established optical model. Parametric optimization revealed that when the PV module installation height was set to 540 mm and the inclination angle was 135°, the system achieved optimal optical performance. Under these conditions, the PV surface attained a maximum optical distribution uniformity of 0.86, and the total optical efficiency reached 80.1%. The sensitivity analysis demonstrated that optical performance is significantly affected by incident angle deviations. When the lateral deviation angle increased from 0° to 3.0°, the total optical efficiency decreased from 80.1% to 67.1%, while the optical distribution uniformity declined from 0.86 to 0.79. The influence of longitudinal deviation was even more pronounced. As the longitudinal deviation angle increased from 0° to 30.0°, the total optical efficiency sharply decreased from 80.1% to 26.4%, and the optical distribution uniformity dropped from 0.86 to 0.74. These results indicate that longitudinal tracking errors have a more severe impact on optical performance than lateral deviations, highlighting the importance of precise solar tracking in practical operation. [Conclusion] This study establishes and experimentally validates an accurate optical model for a linear Fresnel lens-based full-spectrum solar splitting system. The results demonstrate that appropriate configuration of PV installation parameters can significantly enhance optical distribution uniformity and overall optical efficiency. Furthermore, the system exhibits strong sensitivity to incident angle deviations, particularly in the longitudinal direction, which must be carefully controlled in engineering applications. The findings provide theoretical support and quantitative guidance for the structural design, parameter optimization, and operational control of full-spectrum solar splitting systems, contributing to the advancement of high-efficiency solar energy utilization technologies.

Key words: solar energy; full-spectrum; nanofluid; photovoltaic/thermal system; optical path optimization

太阳能利用技术主要包括光伏技术和光热技术两大类[1]。光伏技术是指将太阳的光能直接转换为电能的技术[2]。光热技术是基于太阳能利用的工程热技术，利用太阳辐射对物体进行热量转化，再将热量转换为其他形式的能源[3]。相比这 2 种太阳能利用技术，光伏光热（photovoltaic/thermal，PVT）系统是一种同时结合了光伏与光热的创新技术[4]。PVT 系统可以分为传统余热回收 PVT 系统和光谱分频 PVT 系统 2 类[5]。余热回收 PVT 系统受光伏组件温度限制，即余热回收温度不超过 60 ℃。而光谱分频 PVT 系统通过使用特定的装置或方法，将太阳辐射分为不同的光谱段，从而分别利用这些光谱段进行光伏发电和热利用，实现了太阳能的高效、多元化利用[6]。太阳能分频利用技术的核心在于光谱分频器能够选择性地将不同波长的太阳辐射引导到合适的能量转换装置上[7]，该技术已经成为提高太阳能系统整体效率的有效方法[8]。在各种方法中，薄膜光谱分束器和分频流体光谱分束器因其实用性、可调性以及与 PVT 系统集成的潜力而受到广泛关注[9]。薄膜光谱分束器利用多层介质涂层反射或传输基于干涉原理的特定波长范围[10]。而分频流体是一种动态的、自适应的光谱分裂介质，通过将具有特定光学特性的纳米颗粒分散到基液中，这些纳米流体可以吸收和散射选定的太阳光谱部分[11-12]。对比上述 2 种分频技术，薄膜光谱分束器目前无法大规模工业应用，而分频流体成本低、系统简单，具备大规模应用的潜力。

围绕各类太阳能分频流体已开展了不同程度的研究。例如，王刚等[13]制备了 Ag 纳米颗粒和 Ag/水纳米流体，结果显示，使用 Ag/水纳米流体的双流道 PVT 系统可以在较长时间内稳定运行。刘炜等[14]以去离子水为基液，利用贵金属 Ag 纳米颗粒与无机 $CoSO_4$ 组合实现一种具有高效调控光学特性的分频液体，实验结果表明，水基分频液表现出优异的高效红外吸收特性，引入 Ag 纳米颗粒后，该分频介质在可见光波段 435 nm 处呈现出显著的吸收峰；进一步添加 $CoSO_4$ 后，不仅有效拓宽了纳米流体的吸收峰宽度，同时显著增强了其在红外波段的吸收性能。刘仙萍等[15]提出了一种基于水基 Ag-SiO_2 纳米流体的新型分频 PVT 系统结构，该纳米流体同时作为分频介质和集热工质，研究表明，当 Ag-SiO_2 纳米流体的质量分数为 0.025%时，系统

综合效率达到 63.21%，相较于传统以水作为分频流体的系统综合效率显著提升了 38.04%。王刚等[16]提出了一种新型槽式聚光分频光伏/光热系统，选用乙二醇/氧化铟锡（ITO）纳米流体作为光谱分频器，测试结果表明，优化配比的纳米流体在 250~2 500 nm 光谱范围内的平均透射率和吸收率分别达到 69.1%和 30.9%。

目前，现有纳米流体体系供热参数较低，为实现较高供热参数，本文基于氧化锡锑分频流体和线性菲涅尔透镜开发了一种新的 PVT 系统，为提高系统的光学效率，对系统的光路设计进行优化，并分析了系统在不同横向和纵向误差角下的系统光学性能。

1 新型 PVT 系统与方法

1.1 新型 PVT 系统

在太阳能光伏领域，菲涅尔透镜作为聚光部件能够将大面积的光线转换成小面积的光线，提高太阳能电池的发电效率[17-18]。菲涅尔透镜基于折射的光学原理，其中一系列同心或线性棱镜部分被设计成弯曲并将入射的平行阳光聚焦到一个焦点线上。与传统的曲面透镜不同，菲涅尔透镜使用平坦紧凑的轮廓实现类似的聚光效果，显著减少了材料使用和光学厚度。菲涅尔透镜的主要优点包括结构轻，制造成本低，易于集成到大面积太阳能聚光系统中[19]。菲涅尔透镜能够以最小的畸变实现高光学聚光从而提高太阳能收集效率，且系统结构简单和成本较低。基于菲涅尔透镜的 PVT 系统的原理如图 1 所示。

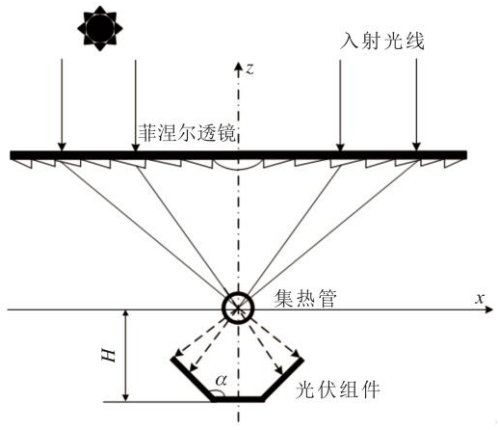


图 1 基于菲涅尔透镜的光伏热系统原理
Fig.1 Principle of the PVT system based on Fresnel lens

图 1 中的集热管放置在菲涅尔透镜下方焦点处，光伏组件置于集热管下方。入射光线首先照射到菲涅尔透镜上，然后折射到集热管上，透过集热管表面的光学玻璃到达内部的分频流体；集热管内部的分频流体部分太阳光线通过集热管到达光伏电池组件表面进行光伏利用，其他太阳光线被吸收进行光热利用。光热部分可以用于工业园区热水供应、海水淡化等。

假设集热管中心为原点，则菲涅尔透镜位于集热管上方 1 000 mm 处，而集热管与光伏组件之间的距离为 H。为提高系统的光学效率，需对光伏组件的放置高度 H 以及光伏组件之间的夹角 α 进行设计优化。

图 2 为基于菲涅尔透镜的光伏热实验系统示意，结构参数如表 1 所示。为了保证入射光线始终垂直入射至光伏热系统，本实验装置底部安置了单轴追踪器。该系统主要由菲涅尔透镜（材料为 PMMA）、集热管（一种双层玻璃管，材料为高硼硅）、光伏组件和辅助装置（如支撑结构等）组成。光伏组件为晶硅薄膜电池，纳米分频流体在集热管内部。本文中的分频流体为氧化锡锑纳米分频流体，其热物性参数分别为：ρ=1.86 g/cm^3，λ=0.6 W/(m·K)，μ=15 mPa·s，c_p=1.4 kJ/(kg·K)，分频流体的分频曲线如图 3 所示。

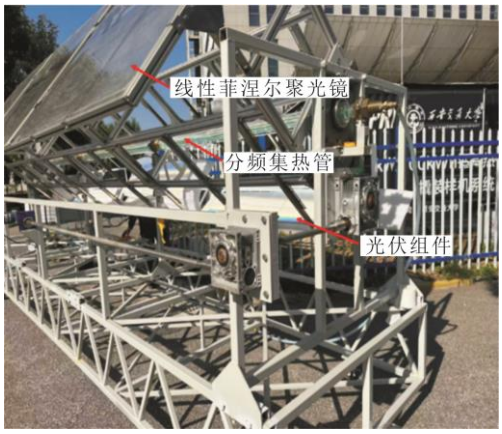


图 2 基于菲涅尔透镜的 PVT 实验系统
Fig.2 The experimental PVT system based on Fresnel lens

表 1 基于菲涅尔透镜的 PVT 系统的结构参数 单位：mm
Tab.1 Structural parameters of the PVT system based on Fresnel lens

参数	数值/mm
光伏电池宽度	250
菲涅尔透镜宽度	1 400
菲涅尔透镜焦距	1 000
集热管外层玻璃内径	80
集热管内层玻璃内径	40
集热管玻璃厚度	3

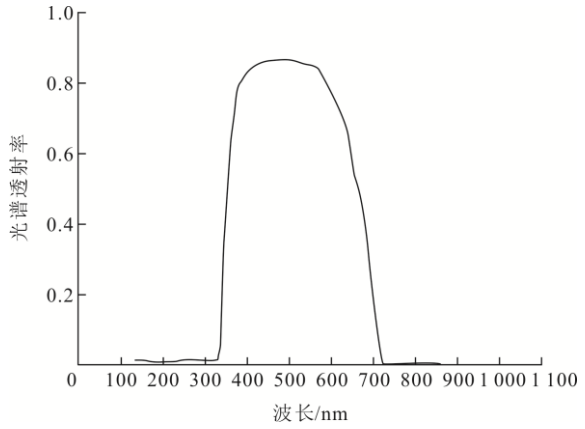


图 3 分频流体光谱透射曲线
Fig.3 Spectral transmission curve of the frequency-divided fluid

1.2 TracePro 仿真软件介绍

TracePro 软件是一款具有强大光学分析功能的软件，现阶段普遍用于照明系统、光学分析、辐射度分析及光度分析的光学模拟软件研究[20-21]。TracePro 软件应用“蒙特卡洛光线追迹”（Monte Carlo）技术来追迹光线。光线在实体模型中沿着不同路径传播时，TracePro 通过跟踪每条光线的光通量，计算光的吸收、反射、折射、衍射和散射能量，并且能够提供完整的分析图形及表格[22-23]。

1.3 性能指标

光学效率以及光分布均匀度是评价所提出的基于菲涅尔透镜的光伏/光热系统的重要指标。

系统总光学效率为[24-25]：

$$\eta_{\text{opt}}=\frac{Q_{\text{PV}}+Q_{\text{tube}}}{Q_{\text{in}}} \tag{1}$$

式中：Q_{in} 为入射到菲涅尔聚光器上的辐射通量，kW；Q_{PV} 为落在光伏电池组件的辐射通量，kW；Q_{tube} 为落在光伏电池组件和集热管上的辐射通量，kW。在实际工程中，透镜的光学效率与透镜的光学损失密切相关。导致菲涅尔透镜光学损失的原因很多，包括反射损失、吸收损失、工艺性损失等，其中工艺性损失主要指拔模角、圆角减少了聚光器光能的接收面积，从而降低了光学效率。

光分布均匀度为[26-27]：

$$\Delta E=1-\frac{E_{\max}-E_{\min}}{E_{\max}+E_{\min}} \tag{2}$$

式中：$E_{\max}$ 为接收面上光功率密度的最大值，kW/m^2；$E_{\min}$ 为接收面上光功率密度的最小值，kW/m^2。光分布均匀度越高，光伏电池接收到的光线能量越均匀，光电转换效率也就越高，从而提高 PVT 系统的整体发电效率。

2 结果与讨论

2.1 模型验证

本文对激光在不同位置垂直照射菲涅尔透镜进行了实验，并测量光线落在集热管和光伏组件的位置，结果如图 4 所示。图 4 中：l 为光线入射点与菲涅尔透镜边缘的距离；s 为光线落在集热管的位置与集热管中心的水平距离；d 为光线落在光伏组件的位置与光伏组件边缘的水平距离。

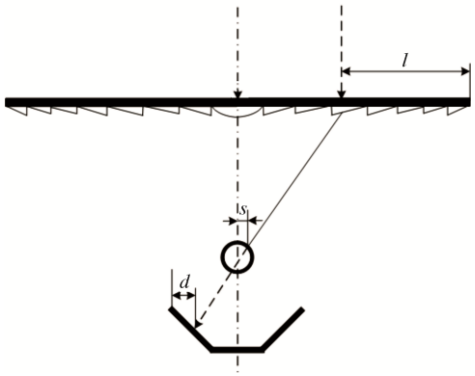


图 4 模型验证单激光光路示意
Fig.4 Schematic diagram of single laser optical path (model validation)

在 TracePro 软件中，同样进行了相关的模拟，以验证数值模拟的可靠性。假设光照强度为 1 000 W/m^2，图 5、图 6 显示了不同光线入射点与菲涅尔透镜边缘距离的条件下实验和模拟光路。

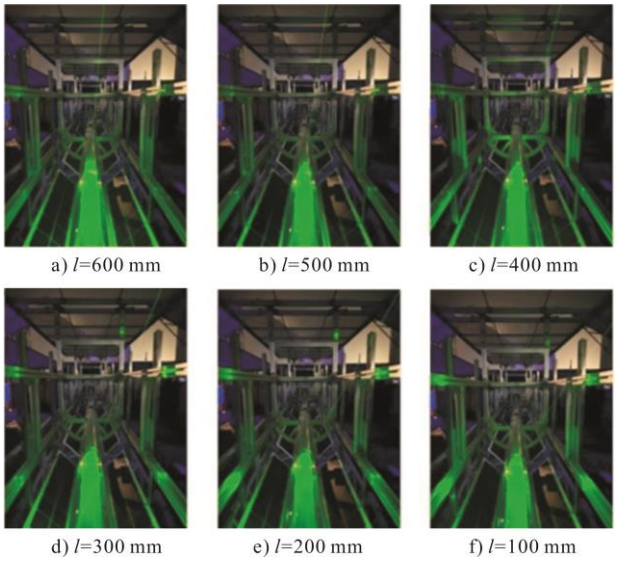


图 5 实验测试单激光光路示意
Fig.5 Schematic diagram of single laser optical path for experimental testing

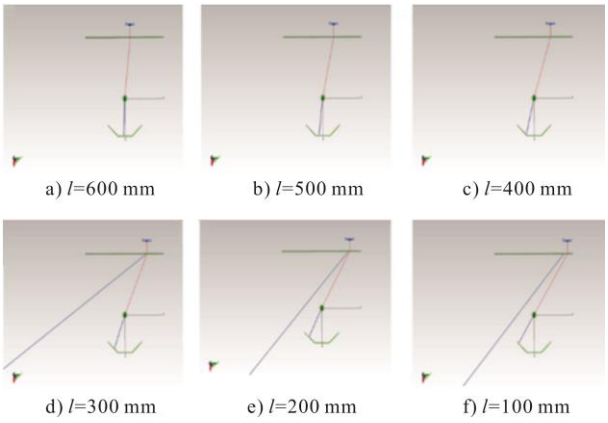


图 6 模拟测试单激光光路示意

Fig.6 Schematic diagram of single laser optical path for simulation testing

从图 5、图 6 可以看出：当光线入射点与菲涅尔透镜边缘的距离增加时，s 呈增大趋势；与之相反，随着光线入射点与菲涅尔透镜边缘的距离增加，d 呈降低趋势。

表 2 为不同光线入射点与菲涅尔透镜边缘距离下 s 和 d 的实验与模拟结果。从表 2 可见，s 和 d 的实验与模拟结果比较吻合，相对误差在 1%以内。这也证明了本文采取的数值模型的精确性和可靠性。

表 2 实验和模拟结果

Tab.2 The experimental and simulation results

l/mm	s/mm	d/mm	相对误差/%
	实验/模拟	实验/模拟	s/d
100	40.0/39.7	25.0/24.8	0.75/0.80
200	45.0/44.6	71.0/70.8	0.80/0.28
300	27.0/27.1	115.0/115.6	0.37/0.52
400	18.0/17.9	190.0/189.2	0.55/0.42
500	10.0/9.9	240.0/241.0	1.00/0.42
600	4.0/4.01	290.0/288.9	0.25/0.38

2.2 光路优化

光学参数和结构参数可直接或间接影响基于菲涅尔透镜的 PVT 系统中太阳能辐射通量的接受情况以及利用率。为了明确基于菲涅尔透镜的光伏/光热系统中结构参数与典型光学参数之间的相互影响关系，本节在假设入射辐射强度为 1 000 W/m^2 条件下，对基于菲涅尔透镜的光伏/光热系统的典型结构参数（包括光伏组件安装高度、光伏组件夹角）与光学参数（包括光伏组件上光分布均匀度、系统总光学效率）的影响关系进行分析。

2.2.1 光伏组件高度优化

在整个 PVT 综合利用系统中，由于集热管安置在菲涅尔透镜焦点处，因此其接收的辐射通量不变，而位于其下方的光伏组件安装高度对整个系统的辐射接收效果以及总光学效率都有很大影响。分析光伏组件的安装高度对光伏组件表面的光分布均匀度以及系统总光学效率的影响，结果如图 7 和表 3 所示。当光伏组件安装高度从 300 mm 增至 1 200 mm 时，左右两侧的光伏电池表面的光分布均匀度先是迅速增大，然后再缓慢升高；而中间的光伏电池表面光分布均匀度保持稳定，几乎不变。系统总光学效率随着光伏电池组件安装高度从 300 mm 增至 540 mm 过程中，总光学效率先保持不变，然后呈下降变化趋势。从表 3 中还可见：当光伏组件安装高度从 300 mm 增至 540 mm 时，系统整体光学效率大约保持在最大值 80.1%；当光伏电池组件安装高度继续从 540 mm 增至 1 200 mm 时，系统整体光学效率迅速下降至 80.1%。

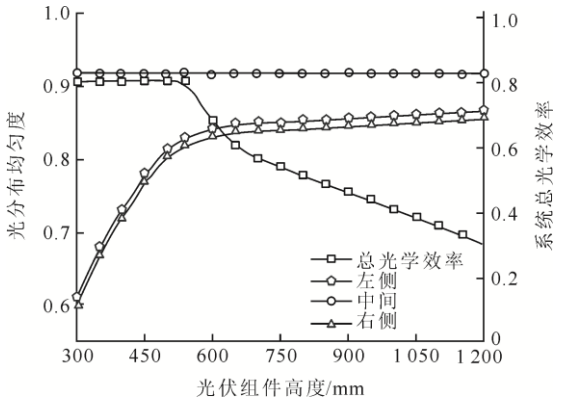


图 7 光伏组件在不同安装高度时表面的光分布均匀度及系统总光学效率

Fig.7 Optical distribution uniformity on surface and overall optical efficiency of photovoltaic module at different installation heights

表 3 不同安装高度光伏组件表面光分布均匀度及系统总光学效率模拟结果

Tab.3 Simulation results of optical distribution uniformity on the surface of photovoltaic module and overall optical efficiency of the system at different installation heights

高度/mm	光伏组件光分布均匀度			光学效率
	左侧	中间	右侧	
300	0.610	0.918	0.600	0.802
428	0.760	0.919	0.750	0.801
533	0.825	0.918	0.815	0.800
538	0.827	0.919	0.817	0.801
540	0.830	0.920	0.820	0.801
548	0.834	0.918	0.824	0.795
558	0.838	0.919	0.828	0.783
578	0.842	0.918	0.832	0.757
628	0.847	0.919	0.837	0.646
728	0.851	0.920	0.841	0.582
928	0.855	0.919	0.845	0.447
1 200	0.860	0.918	0.850	0.295

为了更好地理解图 7 各曲线变化趋势的原因，图 8 给出了光伏组件（左侧和中间）在 8 种不同安装高度时表面的光功率密度分布曲线。当光伏电池组件安装高度小于 540 mm 时，虽然系统总光学效率保持不变（80.1%），然而图 8 中光伏电池组件中的左右两侧的光伏电池表面的光分布均匀度明显较差，并且光伏组件表面的最大光功率密度明显升高。这是因为，光伏组件与集热管间距越短，经集热管透射过后的光线无法恰好被左右两侧的光伏电池边缘所接收，而是趋于中间光伏电池，导致左右两侧的光伏电池的部分太阳能接收表面无法接收到太阳光线。当光伏电池长期在这种环境下工作时，会导致其表面的温度分布不均产生热应力，破坏系统运行的稳定性。

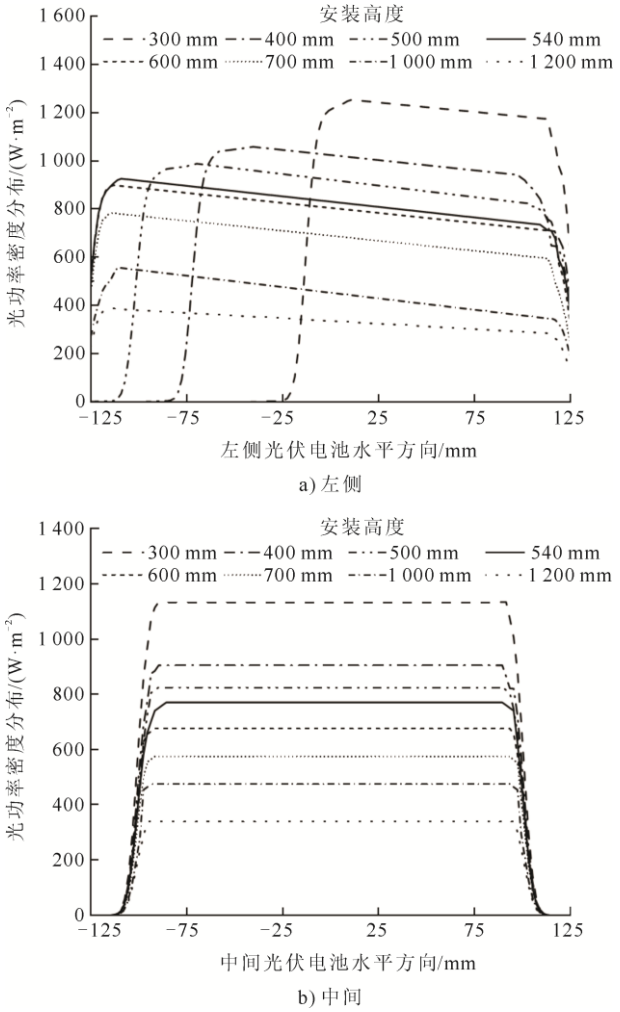


图 8 光伏组件不同安装高度表面光功率密度分布曲线

Fig.8 Distribution curves of optical flux density on the photovoltaic module surface at different heights

从图 8 可见，当光伏组件安装高度大于等于 540 mm 时，左右两侧光伏电池的光分布均匀度呈增加变化趋势，然而光伏组件表面的最大光功率密度明显下降。这是由于经集热管透射出的部分太阳光线未能被左右两侧光伏电池表面接收所致。综上所述，光伏组件的最佳安装高度为 540 mm，此时光伏组件表面的平均光分布均匀度为 0.86。

2.2.2 光伏组件夹角优化

光伏组件夹角是整个系统中的关键参数之一，分析了在不同光伏组件夹角下光伏组件表面的光分布均匀度以及系统总光学效率，结果如图 9 所示。当光伏组件夹角从 110 °增至 150 °时，左右两侧光伏电池表面光分布均匀度均先呈增大趋势，然后略有下降；中间光伏电池表面光分布均匀度几乎不变。当光伏组件夹角为 135 °时，光伏组件表面的平均光分布均匀度为 0.86。由图 9 还可见，随着光伏组件夹角增大，系统的总光学效率先达到最大值，然后明显呈下降变化趋势。当光伏组件夹角为 135 °时，系统的整体光学效率达到最大值；当光伏组件夹角从 135 °增到 150 °时，系统整体光学效率从 80.1%降至 55.8%。这是因为当光伏组件夹角大于或小于 135 °时，部分光线未被光伏组件接收，使得接受的辐射能量变小，总光学效率降低。

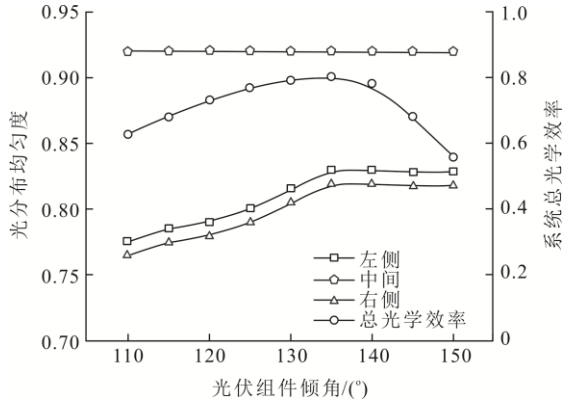
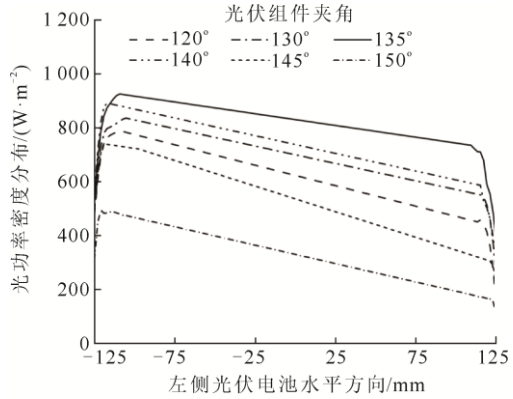


图 9 光伏组件不同夹角时表面光分布均匀度及系统总光学效率

Fig.9 Optical distribution uniformity on surface and overall optical efficiency of the photovoltaic module at different angles

为了更好地理解图 9 中各曲线变化趋势的原因，图 10 分析了光伏电池组件（中间和左侧）在 6 种不同光伏组件夹角下光伏组件表面的光功率密度分布曲线。从图 10 可见：光伏组件夹角的变化基本不影响中间光伏电池表面的光功率密度分布，主要对两侧的光伏电池表面的光功率密度分布产生影响。光伏组件夹角大于或小于 135 °时的光分布均匀度均小于光伏组件夹角在 135 °时的光分布均匀

度。因此，根据图 9—图 10 综合分析，光伏组件最佳夹角为 135°。



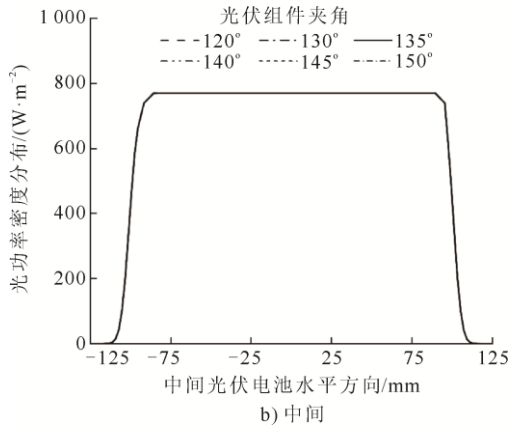


图 10 光伏组件不同夹角表面光功率密度分布曲线
Fig.10 Distribution curves of optical flux density on the photovoltaic module surface at different angles

2.3 系统跟踪性能分析

太阳能跟踪误差是指太阳能跟踪系统在实际运行过程中由于各种因素导致的跟踪角度与太阳实际位置之间的偏差。为了解本文基于菲涅尔透镜的光伏/光热系统对太阳能跟踪的适应能力，引入了光线入射角（图 11）。当入射角越大，说明系统跟踪装置性能很差，反之则越好。本节基于 TracePro 软件考察了光线入射角横向偏差（1°、2°、3°）和纵向偏差（10°、20°、30°）对光伏组件上光分布均匀度以及系统总光学效率的影响。

2.3.1 入射角横向偏差影响

图 12 显示了当横向入射偏差角从 0°增加到 3.0°时，光伏组件上的光分布均匀度与系统总光学效率的变化。从图 12 可见，随着横向入射偏差角的增大，光伏组件表面的光分布均匀度均呈下降变化趋势。当横向入射偏差角从 0°增加到 3.0°时，系统总体光学效率从 80.1%降至 67.1%；而光伏组件表面的平均光分布均匀度从 0.86 降低至 0.79。这是由于系统在采用南北或东西向布置时，由于其只能绕单轴进行一维转动，会导致入射光线与聚光镜表面产生非垂直的斜向照射情况。

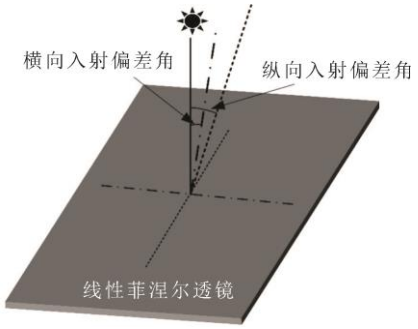


图 11 入射偏差角示意
Fig.11 Schematic diagram of the incident deviation angle

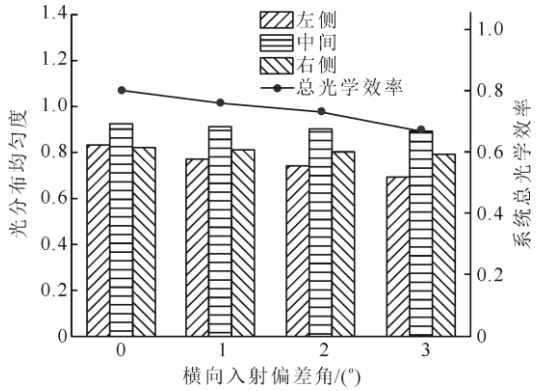
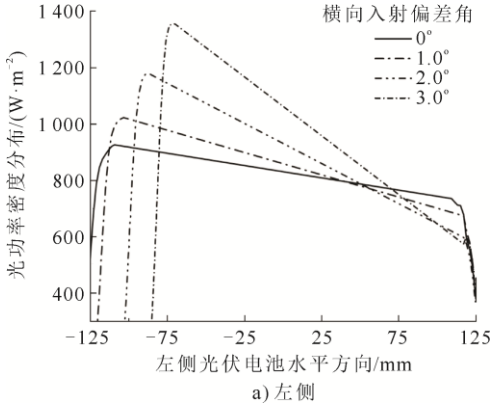


图 12 不同横向入射偏差角下光伏组件光分布均匀度与系统总光学效率
Fig.12 Optical distribution uniformity on the photovoltaic module and overall optical efficiency of the system at different lateral incidence deviation angles

图 13 给出了在不同横向入射偏差角下光伏组件左侧和中间 2 块电池表面的光功率密度分布曲线。从图 13 可见：随横向入射偏差角增大中间光伏电池表面的光分布曲线仍维持在相对较高的均匀度；左侧光伏电池的光分布均匀度明显下降，并且光功率密度分布曲线整体向右移动。



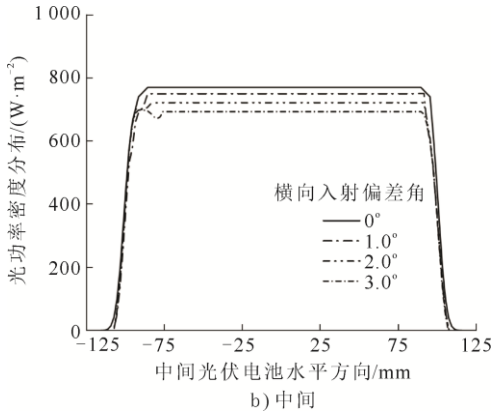


图 13 不同横向入射偏差角下光伏组件光功率密度分布
Fig.13 Distributions of optical flux density on the photovoltaic module at different lateral incidence deviation angles

2.3.2 入射角纵向偏差影响

图 14 显示了当纵向入射偏差角从 0°增加到 30.0°时光伏组件的光分布均匀度与系统总光学效率变化。从图 14 可见，随着纵向入射偏差角的增大，光伏电池组件表面的光功率分布均匀度均呈下降趋势。当纵向入射偏差角从 0°增加到 30.0°时，系统总光学效率从 80.1%降至 26.4%，平均光分布均匀度从 0.86 降至 0.74。这是因为当纵向入射角增大时，部分光线无法有效地被菲涅尔透镜聚焦或导向预定的方向，导致大量光线落在设定的焦斑区域之外。

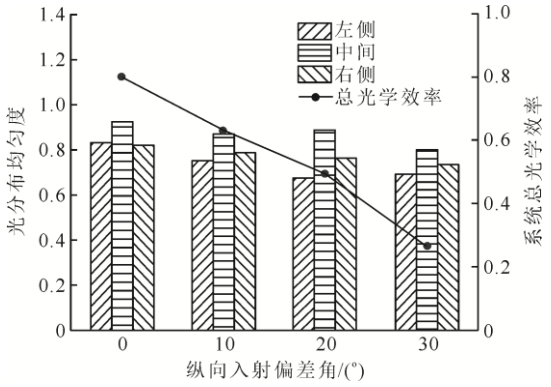


图 14 不同纵向入射偏差角下光伏组件的光分布均匀度与系统总光学效率
Fig.14 Optical distribution uniformity on the photovoltaic module and overall optical efficiency of the system at different longitudinal incidence deviation angles

图 15 给出了不同纵向入射偏差角下光伏组件表面的光功率密度分布曲线。从图 15 可见，随纵向入射偏差角增大，光伏组件表面的光功率密度分布曲线整体均向右移动，并且呈显著下降趋势，这说明光伏组件表面接收的辐射能量在变小。此时，因为绝大多数光线纵向入射偏差角过大，而无法到达接收表面，造成较大的能量损失。

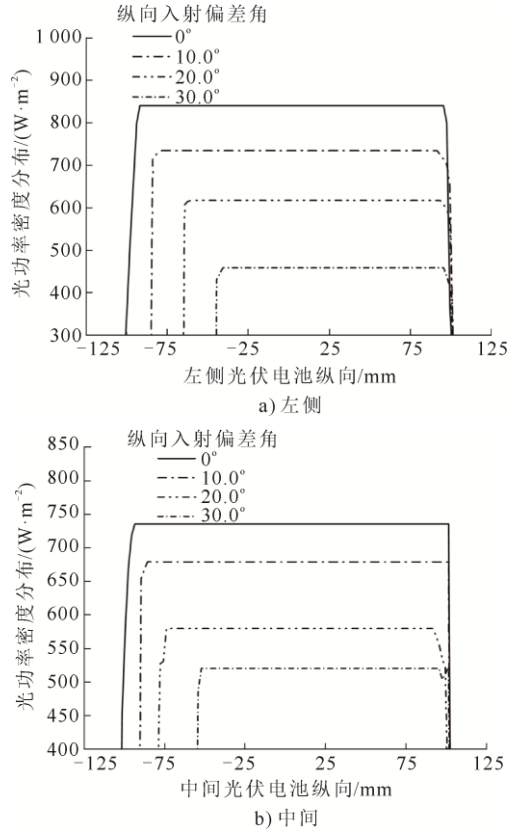


图 15 不同纵向入射偏差角下光伏组件光功率密度分布
Fig.15 Distributions of optical flux density on the photovoltaic module at different longitudinal incidence deviation angles

3 结　论

为了提高光伏/光热系统的光学效率，本文对光伏组件的安装高度和安装角度进行了优化，并分析了入射角横向偏差和纵向偏差对系统光学效率的影响，主要结论如下。

1）系统存在一个最佳光学路径，即当光伏组件安装高度和夹角分别为 540 mm、135°时，光伏组件表面能够实现较高的平均光分布均匀度以及系统总光学效率，分别达到 0.86 和 80.1%。

2）0°~3.0°的入射角横向偏差对光伏/光热系统的影响分析表明，当横向入射偏差角从 0°增加到 3.0°时，系统总光学效率从 80.1%降至 67.1%，光分布均匀度从 0.86 降至 0.79。

3）对 0°~30.0°的入射角纵向偏差对 PVT 系统的影响分析表明，当纵向入射偏差角从 0°增到 30.0°时，系统总光学效率从 80.1%降至 26.4%，光分布均匀度从 0.86 降至 0.74。

［参 考 文 献］

［1］ LI X, LI R, CHANG H, et al. Numerical simulation of a cavity receiver enhanced with transparent aerogel for parabolic dish solar power generation[J]. Energy, 2022, 246: 123358.

[2] CHEN F, LI M, ZHANG P, et al. Thermal performance of a novel linear cavity absorber for parabolic trough solar concentrator[J]. Energy Conversion and Management, 2015, 90: 292-299.
[3] WANG G, WANG B, YUAN X, et al. Novel design and analysis of a solar PVT system using LFR concentrator and nano-fluids optical filter[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2021, 27: 101328.
[4] SINGH P, RAVINDRA N M. Temperature dependence of solar cell performance: an analysis[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2012, 101: 36-45.
[5] HAMZAT A K, SAHIN A Z, OMISANYA M I, et al. Advances in PV and PVT cooling technologies: a review[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2021, 47: 101360.
[6] KIRAEE S, SABOOHI Y, MOSHFEGH A Z. A new designed linear Fresnel lens solar concentrator based on spectral splitting for passive cooling of solar cells[J]. Energy Conversion and Management, 2021, 230: 113782.
[7] ZAHEDI A. Review of modelling details in relation to low-concentration solar concentrating photovoltaic[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2011, 15: 1609-1614.
[8] 张艳梅. 基于碟式的太阳能二次反射及其分频系统的数值模拟和实验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013: 1.
ZHANG Yanmei. Numerical and experimental study on two-stage and beam splitting systems based on solar dish[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013: 1.
[9] 胡芃, 刘阳, 张谦, 等. 太阳能聚光分频 PV/T 综合利用系统的光学分析[J]. 工程热物理学报, 2015, 36(1): 1-6.
HU Peng, LIU Yang, ZHANG Qian, et al. Optical analysis for a solar concentrating PV/T hybrid system with beam splitter[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2015, 36(1): 1-6.
[10] 刘庆凡. 基于 LFR 聚光器的太阳能聚光分频光伏光热系统及强化传热研究[D]. 吉林: 东北电力大学, 2024: 1.
LIU Qingfan. Study of a solar CPVT system and enhanced heat transfer utilizing linear Fresnel concentrator and spectral beam filter[D]. Jilin: Northeast Electric Power University, 2024: 1.
[11] BOITO P, GRENA R. Application of a fixed-receiver linear Fresnel reflector in concentrating photovoltaics[J]. Solar Energy, 2021, 215: 198-205.
[12] WANG G, YAO Y, LIN J, et al. Design and thermodynamic analysis of a novel solar CPV and thermal combined system utilizing spectral beam splitter[J]. Renewable Energy, 2020, 155: 1091-1102.
[13] 王刚, 陈翔龙, 林建清, 等. 低倍聚光太阳能纳米流体 PV/T 系统实验研究[J]. 工程热物理学报, 2024, 45(11): 3233-3238.
WANG Gang, CHEN Xianglong, LIN Jianqing, et al. Experimental research on solar nanofluids PV/T system with low solar concentration ratio[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2024, 45(11): 3233-3238.
[14] 刘炜, 郑睿, 陈文刚, 等. 液体分频介质的制备及其对光伏/热系统的影响分析[J]. 东北电力大学学报, 2024, 44(2): 21-26.
LIU Wei, ZHENG Rui, CHEN Wengang, et al. Preparation of liquid splitting media andtheir impaction on the PV/T systems[J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2024, 44(2): 21-26.
[15] 刘仙萍, 田东, TAYLOR R A. 水基 Ag-SiO_2 纳米流体分频光伏/光热集热器功能单元性能实验研究[J]. 新能源进展, 2024, 12(4): 425-430.
LIU Xianping, TIAN Dong, TAYLOR R A. Experimental study on performance of spectrum-splitting photovoltaic/thermal hybrid unit using aqueous Ag-SiO_2 nanofluid as working fluid[J]. Advances in New and Renewable Energy, 2024, 12(4): 425-430.
[16] 王刚, 张震, 姜铁骝. 槽式聚光和纳米流体分频 PVT 系统设计与分析[J]. 工程热物理学报, 2025, 46(1): 35-41.
WANG Gang, ZHANG Zhen, JIANG Tieliu. Design and analysis of parabolic trough solar concentration and nanofluid beam splitting PVT system[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2025, 46(1): 35-41.
[17] 张曼铮, 郭伟, 方宇成, 等. 基于太阳能分频利用的光伏/光热综合发电系统热力学分析[J]. 动力工程学报, 2024, 44(8): 1216-1225.
ZHANG Manzheng, GUO Wei, FANG Yucheng, et al. Thermodynamic analysis of a photovolatic/photothermal integrated power generation system based on solar energy spectrum utilization[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2024, 44(8): 1216-1225.
[18] LIU H, ZHU W. Optimisation analysis by numerical simulation of adding internal fins in photovoltaic/thermal system based on Taguchi method[J]. Applied Thermal Engineering, 2025, 266: 125635.
[19] 张洁, 安巍, 朱彤. 聚光型太阳能分频利用系统的光学性能分析[J]. 太阳能学报, 2017, 38(3): 715-720.
ZHANG Jie, AN Wei, ZHU Tong. Optical performance analysis for a spectral splitting photovoltaic thermal hybrid system[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2017, 38(3): 715-720.
[20] YANG N, LIU Q, XUAN J, et al. Enhancing optical and thermohydraulic performance of linear Fresnel collectors with receiver tube enhancers: a numerical study[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2024, 231: 125850.
[21] YANG N, LIU Q, WANG B, et al. A novel PV/T system integrated with spectral beam filter: a comprehensive optical and thermodynamic study[J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 257: 124457.
[22] GUEYMARD C A, MYERS D, EMERY K. Proposed reference irradiance spectra for solar energy systems testing[J]. Solar Energy, 2002, 73(6): 443-467.
[23] YANG N, LUU Q, XING L, et al. A novel linear fresnel solar CPV/T hybrid system with advanced film beam splitter for optimal energy harvesting: optical and thermodynamic analysis[J]. Energy, 2025, 316: 134460.
[24] KARAASLAN I, MENLIK T. Numerical study of a photovoltaic thermal (PV/T) system using mono and hybrid nanofluid[J]. Solar Energy, 2021, 224: 1260-1270.
[25] JIANG T, ZOU T, WANG G, et al. Design and thermodynamic analysis of an innovative parabolic trough photovoltaic/thermal system with film-based beam splitter [J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2023, 47: 10309.
[26] LIANG H, HAN H, WANG F, et al. Experimental investigation on spectral splitting of photovoltaic/thermal hybrid system with two-axis sun tracking based on SiO_2/TiO_2 interference thin film[J]. Energy Conversion and Management, 2019, 188: 230-240.
[27] WANG G, WANG F, CHEN Z, et al. Experimental study and optical analyses of a multi-segment plate (MSP) concentrator for solar concentration photovoltaic (CPV) system[J]. Renewable Energy, 2019, 134: 284-291.

（责任编辑 杨嘉蕾）