

基于光线分布与产能特性的建筑集成用聚光百叶设计

邵泽彪¹, 蔡吕培¹, 方天宇¹, 王 博¹, 孙 良¹, 朱国庆²

(1. 中国矿业大学 建筑与设计学院, 江苏 徐州 221116, 2. 中国矿业大学 安全工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘要: 建筑集成聚光光伏可将直射光线用于产能, 散射光线用于采光。为提高聚光组件对天然光线的层级利用效率, 对线性菲涅尔透镜和接收器在不同距离及不同偏差角度下的光学特性及产能特性进行实验研究, 最终确定聚光百叶设计的接收器间距、宽度及允许偏差角度三个关键参数。结果表明: 对于所选用的 80 mm 宽的线性菲涅尔透镜, 当太阳光线处于无偏差入射状态时, 50 mm 间距下光斑会聚最为集中, 宽度为 2.5 mm。对于以砷化镓太阳能电池作为接收器的电学性能实验结果表明: 光斑均匀性对其最大功率影响不明显。为达到“采光-产能”的平衡, 确定选择 10 mm 宽聚光太阳能电池作为聚光百叶单元接收器, 菲涅尔透镜与接收器的推荐距离为 50~53 mm, 聚光百叶在 4° 以内的偏差范围内均可以正常工作。本研究可为建筑集成用聚光组件的设计提供参考。

关键词: 太阳能聚光百叶; 光线分布; 产能特性; 层级利用

中图分类号: TU375.1

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2023)06-0919-08

Design of solar concentrating louver for building integration based on light distribution and energy production characteristics

SHAO Zebiao¹, CAI Lüpei¹, FANG Tianyu¹, WANG Bo¹, SUN Liang¹, ZHU Guoqing²

(1. School of Architecture and Design, China University of Mining and Technology, Jiangsu Xuzhou 221116, China;

2. School of Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Jiangsu Xuzhou 221116, China)

Abstract: Direct light can be used for energy production and diffused light for daylighting when the concentrating photovoltaics are integrated in the building. The optical and energy production characteristics of linear Fresnel lens and receiver were analyzed experimentally through experiments at different spacings and different deviation angles. The optimum values for key parameters of the receiver spacing, width and allowable deviation angle of the concentrating louver are determined to improve the hierarchical utilization efficiency of natural light. The results showed that for the selected linear Fresnel lens with a width of 80mm, when the solar rays were in unbiased incidence, the light spot was the most concentrated at the distance of 50 mm, and the width was 2.5 mm. The electrical experimental results of GaAs solar cells as receivers show that uniformity of the light spot is not obvious influence on maximum power. In order to achieve the balance of daylighting and energy production, it is recommended to choose 10 mm wide concentrating solar cells as the concentrating louver receiver. The recommended spacing between Fresnel lens and the receiver is 50 mm~53 mm, and the louver can work normally within the deviation range of 4°. This study can provide a reference for the design of concentrating components for building integration.

Key words: solar concentrating louver; light distribution; energy production characteristics; hierarchical utilization

建筑领域节能减碳是实现我国碳达峰、碳中和目标的“关键一环”。无论从我国可持续发展的内在需求, 还是从应对气候变化的外部挑战来说, 推广产能型建筑都是我国未来发展的必然选择^[1-2]。太阳能是最易被建筑直接利用的可再生能源, 建

筑集成光伏技术(Building Integrated Photovoltaics, BIPV)得到了广泛的关注。随着光伏技术更新发展, 用于建筑集成的光伏组件产品也日益增多^[3-4]。聚光光伏是一种新型高效的太阳能利用形式, 相比于传统的光伏技术, 聚光光伏具有将直

收稿日期: 2023-02-15

修回日期: 2023-09-13

基金项目: 江苏省自然科学基金资助项目(BK20210517)

第一作者: 邵泽彪(1988—), 男, 博士, 讲师, 主要从事太阳能建筑方面的研究。E-mail: shaozebiao@cumt.edu.cn

通信作者: 朱国庆(1968—), 男, 博士, 教授, 主要从事建筑性能化防火方面的研究。E-mail: zgq119xz@126.com

射光线会聚、允许散射光线穿过的特征,在建筑中集成聚光技术(Building Integrated Concentrating Photovoltaics, BICPV)可以将会聚的直射光线用于产能,而透过的散射光线用于采光,从而实现对太阳光线的层级利用^[5]。

由于BICPV的上述优势,使其成为产能型建筑的研究热点。Chemisana教授等^[6-7]早在2010年前后就对BICPV的集成设计进行了探讨,针对不同形式聚光与建筑集成的适宜性做了研究,并将这些构件集成在建筑的幕墙、遮阳及屋顶等部位。美国耶鲁大学和伦斯勒理工学院研究团队^[8]设计并实施完成一套建筑集成光伏立面系统。聚光组件所接收到的太阳辐射除了进行光电转化,还可以产生热量为建筑供暖。Parupudi等^[9]从使用人员对于室内环境营造的实际需求出发,对透射式低倍聚光单元的几何形状进行了优化设计。Arvind等^[10]设计了一种基于菲涅尔透镜和凸透镜的聚光组件,并通过实验确定透镜的最佳位置,从无透镜到单透镜的输出功率增加了9.3%,结果表明,从单透镜到两级透镜的输出功率增加了13.1%。Liu和Wu等^[11]设计了一种适合用在窗户上的静态智能聚光光伏系统,通过在窗户上添加反射材料,使得太阳光线被会聚到窗顶部和底部的太阳能电池上,通过对太阳直射光线的吸收利用来改善室内的天然采光质量。Shanks等^[12]对一种嵌入式低倍CPV窗户的涂层、玻璃特性等参数对光线传输损失的影响进行了实验分析,结果表明集成聚光组件之后窗户仍具有良好的光线透过性。Sun Yanyi等^[13]研究了一种聚光光伏组件,发现将该聚光光伏组件集成在高纬度地区的建筑窗口,可提高建筑室内太阳光线分布的均匀性,同时降低产生眩光的风险,提高天然采光质量。

朱丽等^[14-15]对一种高倍透射式聚光模块(500倍)在建筑中的应用进行了集成设计探讨,并以万向轴承为控制节点,设计了一种新型的双轴联动结构,可以实现对聚光阵列的联动控制和对太阳位置的双轴跟踪。陈海飞等^[16]设计了一种建筑耦合的聚光光伏系统,该系统可集成到屋顶部位,在发电的同时,还可以降低太阳曝晒屋顶造成的室内冷负荷,有效地降低了夏季建筑能耗,实现了与建筑的高度耦合及光电光热的综合利用。宣庆东和李桂强^[17-19]设计了一种新型的透光型复合抛物面型聚光器,集成到建筑中之后,建筑室内所获得的天然光水平有所下降,但分布均匀性显著增强。内蒙古工业大学和北京理工大学研究团

队^[20-21]开发一种具有被动光控制功能的透射式聚光系统,集成在双层玻璃幕墙之后可以满足建筑室内的采光需求。邵泽彪等^[22]通过实验与模拟对其开发的建筑集成用高倍透射式聚光模块的光学与产能特性进行研究,并对不同散热条件下的热分布进行了量化研究。

综上所述,BICPV涉及到的能量产出效率、室内光环境等关键问题,其本质是由太阳光线在传输过程中与聚光组件的相互作用决定的,对其光线会聚特性与产能特性的研究,是更好地实现BICPV对天然光线层级利用的基础。本文通过户外实际工况下的动态跟踪实验,对建筑集成用线性菲涅尔聚光透镜在不同入射条件下的光斑分布特性进行研究,在晴天实验工况下,利用CMOS相机拍摄菲涅尔透镜在朗伯板上的会聚光斑,在Matlab软件中进行灰度分析,研究不同入射偏差角度、不同距离位置光斑分布状况,对比分析模拟与实验结果,确定透镜与接收器的最佳距离范围和最大允许入射偏差角度范围等参数;利用太阳能模拟器发射稳定辐射强度,基于光学特性研究所得的最佳距离范围和最大允许偏差角度数据,研究在此范围内不同辐射偏差角度、不同距离下,不同宽度太阳能电池的能量产出特性,从而确定聚光百叶单元设计中接收器距离、最佳宽度,使得所设计的聚光百叶单元具有能量产出效率高、光线遮挡率低、允许偏差角度大的优点。

1 聚光百叶单元组成

本文拟设计的适用于建筑集成的动态聚光百叶,主要由线性菲涅尔透镜、接收器(太阳能电池)和支撑结构三部分构成。菲涅尔透镜与接收器的间距、接收器的宽度是聚光百叶模块设计的关键参数,直接影响着聚光百叶单元的产能效率、光线穿透率和最大允许偏差角度。通过对菲涅尔透镜光学特性及接收器产能特性的研究,最终确定聚光百叶单元的关键设计参数。

综合考虑建筑集成的尺寸要求,选择菲涅尔透镜尺寸为 $1\,200\text{ mm}\times 80\text{ mm}\times 2\text{ mm}$,如图1(a)、(b)所示,考虑到散射光线的透过性,使用杆件支撑以减少遮挡,获得更大的透光率。所选择透镜的设计焦距为 50 mm ,材质为PMMA,透光率为92%,对波长 546 nm 的光谱折射率为1.493。接收器选用LT-CC-30型三结砷化镓聚光太阳能电池,工作温度 $-40\sim 100^{\circ}\text{C}$,本文选择 $10\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ 及 $4.7\text{ mm}\times 5.3\text{ mm}$ 两种尺寸的聚光电池进行对比研

究. 将聚光百叶集成在双层玻璃窗内形成聚光百叶窗, 如图 1(c)所示. 天然光线中的直射光线被菲涅尔透镜会聚在聚光电池上用于产能, 散射光线不会被会聚, 穿过聚光百叶进入室内, 提供天然采光, 从而实现对天然光线的层级利用.

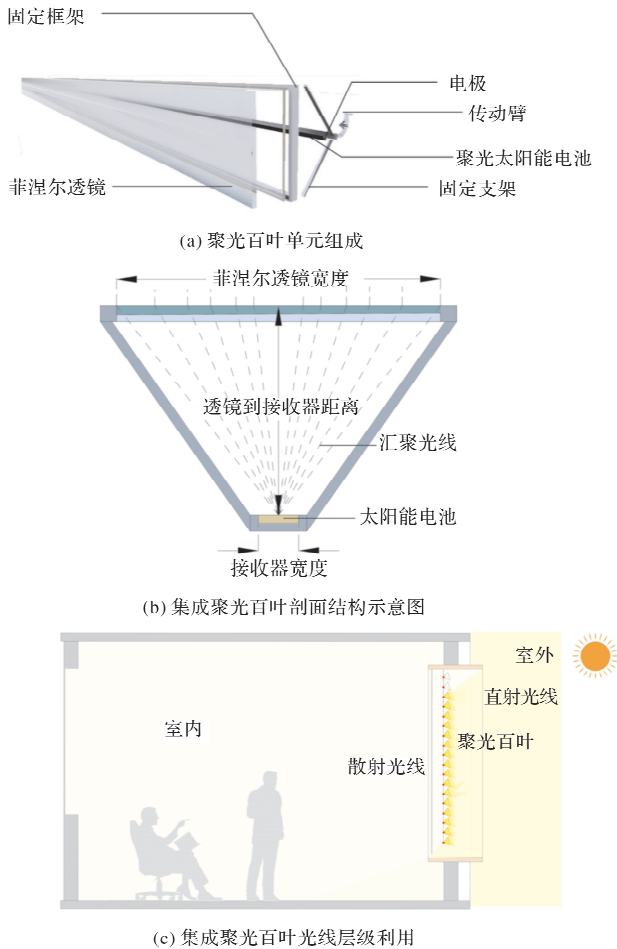


图1 建筑集成聚光百叶设计

Fig. 1 Design of building integrated spotlight shutter

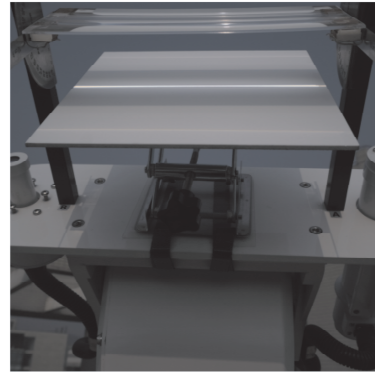
2 聚光模块的光学特性实验

2.1 实验介绍

菲涅尔透镜在不同间距和不同直射光偏差角度下的光斑会聚特性也会不同^[23], 因此对聚光百叶在不同入射条件下的光斑特性进行研究. 光学特性的实验检测装置如图 2 所示, 将菲涅尔透镜与朗伯板固定在 TBS-YG1 型全自动双轴太阳跟踪器上, 通过 PC-2-T1 型太阳辐射监测系统, 自动追踪太阳朝向并记录总辐射、直射辐射、散射辐射等太阳参数. 采用 150 mm×150 mm 标准漫反射板(反射率 95%)作为朗伯面, 并固定在升降工作台上, 朗伯面各向同性的特性使得各个角度观察到的光强一致. 实验于 2022 年 1 月 19 日进行, 测试平台位于中国矿业大学力学与土木工程学院五楼的室外露台上.



(a) 追光装置



(b) 聚光装置

图2 实验平台

Fig. 2 Experimental platform

会聚光斑的能量密度高, 与周围无会聚光斑处存在较大亮度差, 在 CMOS 相机镜头前添加透光率为 5% 的中性减光片来降低拍摄照片上的太阳光强, 将灰度值控制在 225 以内, 以通过间接测量法准确获得光斑分布状况. 通过 CMOS 相机拍摄实验工况下朗伯面上的会聚光斑, 利用照片上灰度值与光强成正比这一特性, 由式(1)可得各点能流密度值.

$$I = F_c \cdot GV \quad (1)$$

式中: I 为能流密度值, W/m^2 ; F_c 为能流密度值与灰度值换算比例系数, W/m^2 ; GV 为照片灰度值.

F_c 可由式(2)求解.

$$F_c = \frac{P_1}{\sum_{i=1}^n A_i GV_i} \quad (2)$$

式中: P_1 为朗伯面测试面积内功率, W ; n 为测试面积内照片像素数; A_i 为单个像素对应朗伯面面积, m^2 ; GV_i 为照片中各像素灰度值.

实验当日气象条件如图 3 所示. 实验分为两部分进行, 第一部分为太阳光线垂直入射到菲涅尔透镜, 调整菲涅尔透镜与朗伯面间距离. 通过初步实验, 确定间距的调整范围为 40~60 mm, 控制间隔 1 mm, 共 21 组; 第二部分为固定菲涅尔透镜与朗伯板间距离, 10° 以内每间隔 1° 调整菲涅尔透镜与直射光线的偏差角度, 另对 15° 、 30° 、 45° 等偏差角度下的光斑特性进行记录, 共 14 组.

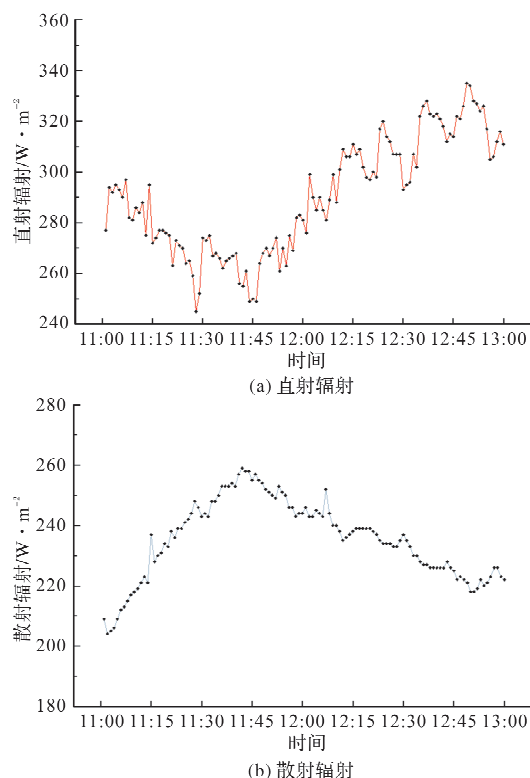


图3 实验当日太阳辐射条件

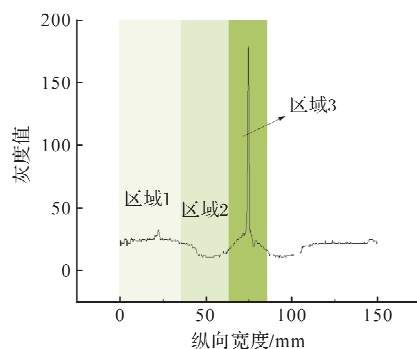
Fig. 3 Solar radiation conditions on the day of experiment

2.2 不同间距下光线传输分析

对拍摄到的照片在图像处理软件中进行矫正处理,得到不同间距下朗伯面上的光斑分布图片,50 mm 间距下无偏差角度时所拍摄的朗伯面上的光斑照片及灰度值曲线如图4所示。



(a) 光斑照片



(b) 灰度值曲线

图4 50 mm 间距下无偏差角度图

Fig. 4 Angle diagram without deviation at 50 mm spacing

从图4可以发现,光斑图像可以明显看出分为三个区域。区域1为直接受太阳照射区域,包括直射光与散射光;区域2为非涅尔透镜背后区域,由于直射光线被会聚,因此所获得辐射强度最低;区域3为光斑区域,所接受的光强最高。

将光斑图处理后提取灰度值如图5所示。

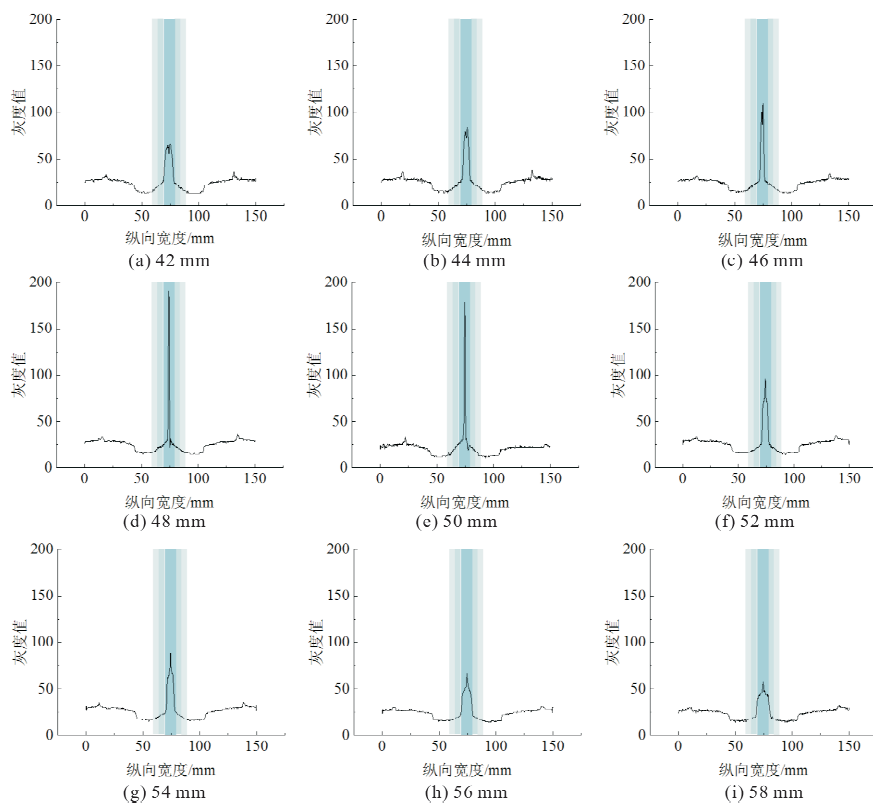


图5 不同间距下无偏差角度时光斑纵向灰度值曲线

Fig. 5 Longitudinal gray value curve of light spot without deviation angle under different spacing

图中由深到浅分别标定 5 mm、10 mm、15 mm 宽度区域, 用以研究适宜的太阳能电池宽度. 从图中可以发现, 间距为 50 mm 时光斑会聚的集中度最高, 以 50 mm 为界, 随着间距的减小或者增大, 光斑宽度都呈现出扩大趋势, 同时光斑宽度区域内光强随之下降. 从光斑分布来看, 光强最强的中心斑分布在 5 mm 区域内, 次级光斑分布

在 10 mm 区域内, 15 mm 区域内光斑强度大部分已低于太阳直接照射强度, 利用效率低.

3.3 不同偏差角度下光线传输分析

对 50 mm 间距下不同偏差角度的会聚光斑进行实验测试, 图 6 即为根据拍摄朗伯面上会聚光斑分布照片统计的灰度值分布图.

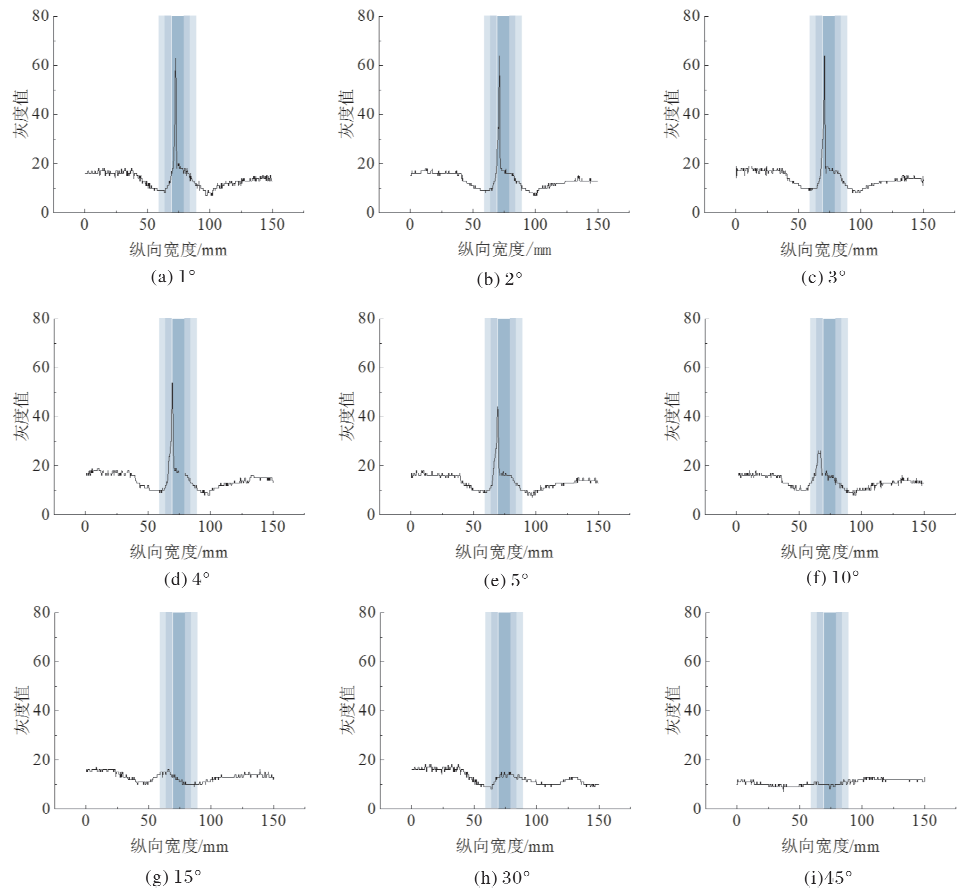


图 6 50 mm 间距不同偏差角度灰度值曲线图

Fig. 6 Gray value curve under different deviation angles at 50 mm spacing

如图 6, 随着偏差角度的增大, 灰度值最高点不断下降, 即会聚光斑的中心光强在下降, 同时光斑位置逐渐偏移, 在中心光斑两侧形成不均匀分布的次级光斑. 如图 7 所示不同偏差角度下的光斑偏离中心线距离, 当太阳光线偏差角度控制在 2° 以内时, 光斑可保持在宽度为 5 mm 的接收区域内; 当太阳光线偏差角度控制在 4° 以内时, 光斑可保持在宽度为 10 mm 的接收区域内. 当偏差角度达到 15° 时, 中心光斑光强与直接受太阳照射处光强几乎相等, 菲涅尔透镜在 50 mm 间距的平面上已无聚光效果; 偏差角度继续增加, 光强分布对聚光器实际效果已无明显影响, 可认为聚光百叶处于非工作状态.

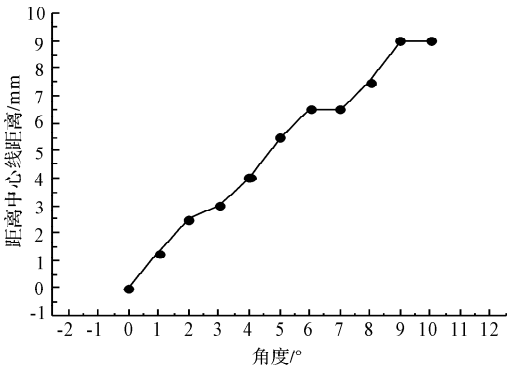


图 7 不同偏差角度下光斑距离中心线长度

Fig. 7 Length of light spot from centerline under different deviation angles

3 聚光模块电性能实验

3.1 测试条件与工况

为进一步确定聚光百叶的接收器宽度、最佳间距、最大允许偏差等关键设计参数,利用太阳模拟器发射稳定的辐射强度,对聚光百叶在不同间距及不同偏差角度下的电性能进行实验分析.如图8(a)所示,实验系统由美国 Newport 公司的 Oriel-91191 型太阳模拟器、Newport 公司的 66902 型 IPCE 测试光源、美国 Keithley 公司的 Keithley-2420 型 I-V 测试系统以及计算机组成.接收器选择 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 及 $4.7\text{ mm} \times 5.3\text{ mm}$ 两种规格砷化镓聚光太阳能电池进行对比测试.

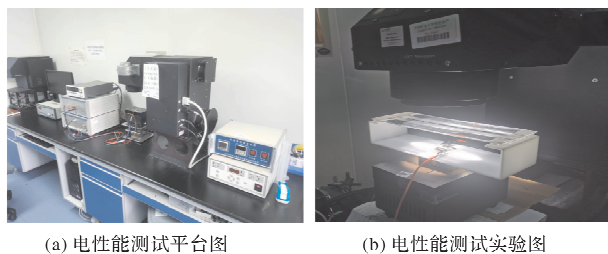
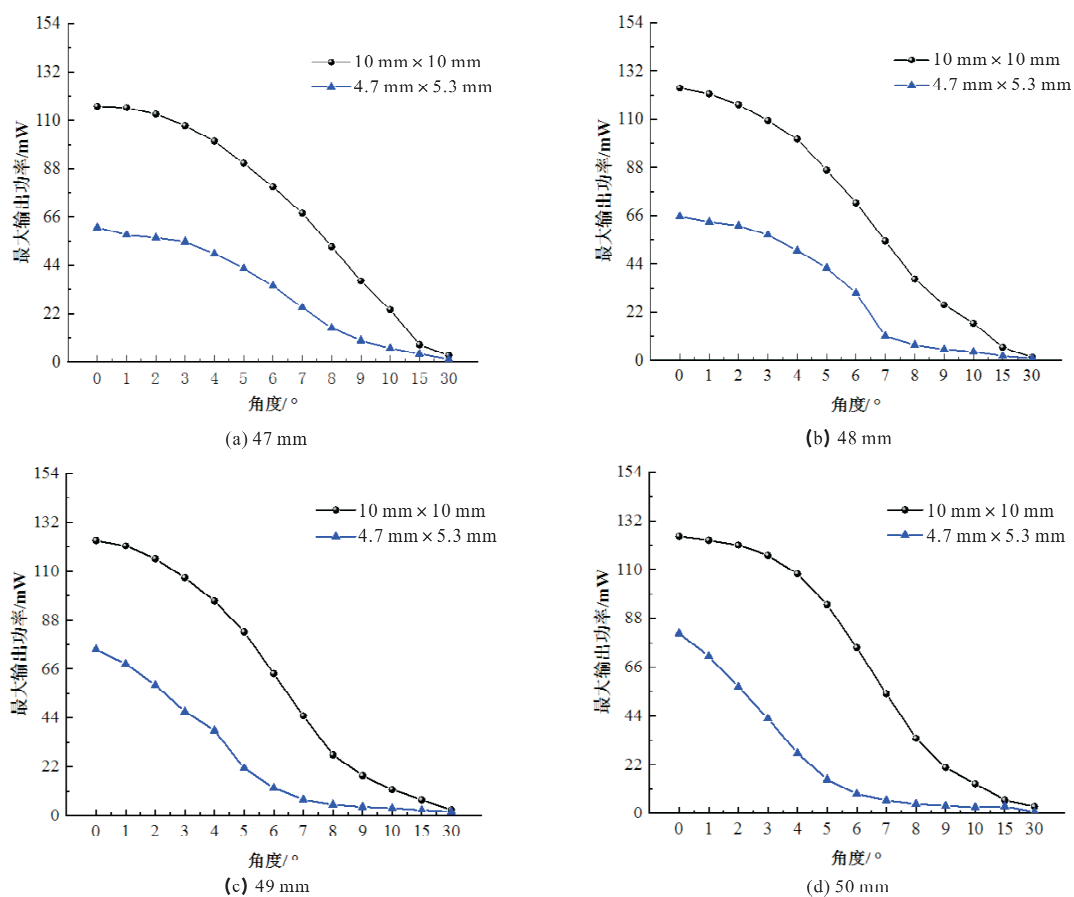


图8 电性能测试场景

Fig. 8 Electrical performance test scenario



基于光学实验结果,电学性能实验控制菲涅尔透镜与聚光太阳能电池间距在 $47 \sim 53\text{ mm}$ 之间,间隔 1 mm ,共7组.偏差角度为从 0° 至 10° 每间隔 1° ,以及 15° 和 30° 等13组,实验如图8(b)所示.

3.2 实验结果分析

聚光太阳能电池最大输出功率如图9所示,在 50 mm 间距无偏差入射条件下电池的输出功率达到最大值,且随间距增大或减小而降低.相同间距下,随着入射偏差角度的增大,太阳能电池最大功率也随之下降.这是由于在允许偏差角度内,照射在太阳能电池上的辐射强度下降缓慢,随着跨过偏差角度的允许值,部分光斑超出太阳能电池的接收范围,照射在太阳能电池上的辐射强度快速下降,当几乎无光照时达到最低值附近并缓慢降低,因此照射在太阳能电池上的辐射强度总体呈现先快后慢的降低趋势.且在 $50 \sim 53\text{ mm}$ 间距范围内偏差角度对于产电效率的影响更小. $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 尺寸的接收器在 $47 \sim 53\text{ mm}$ 间距下允许偏差角度可达到 4° , $4.7\text{ mm} \times 5.3\text{ mm}$ 在 $47 \sim 53\text{ mm}$ 间距下允许偏差角度下降至 2° .

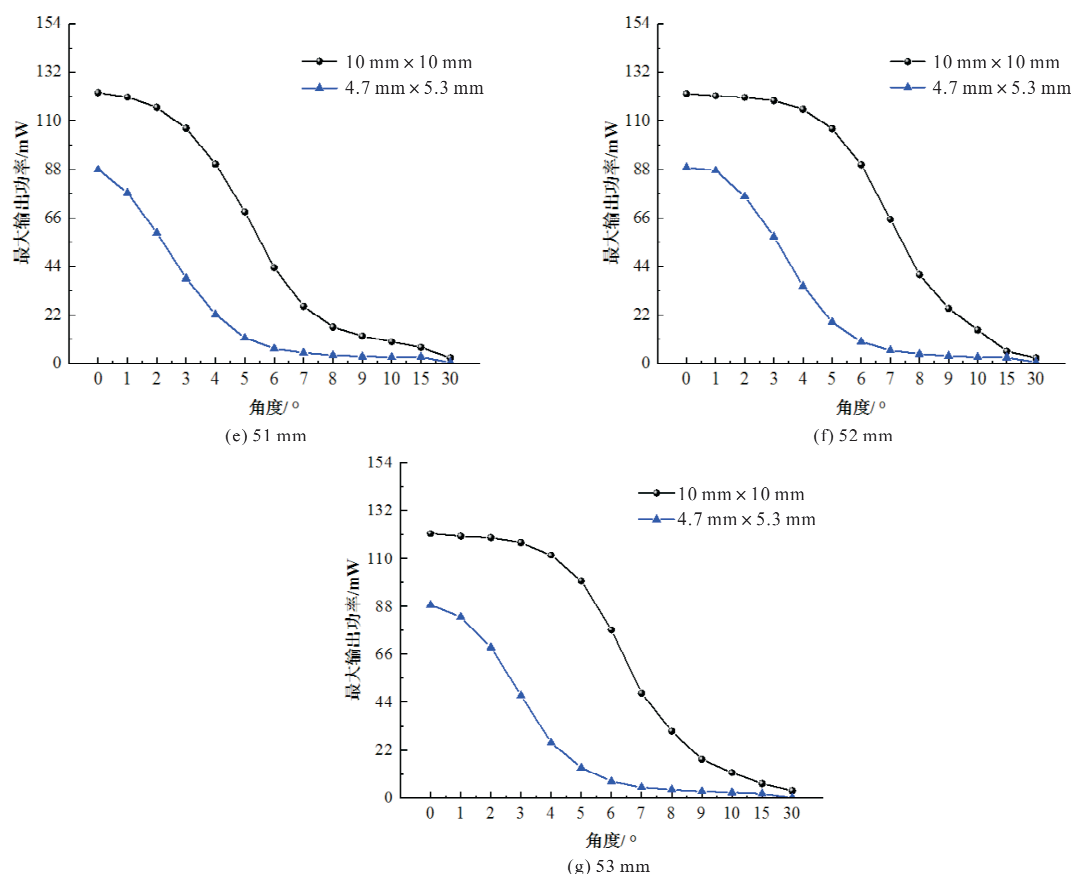


图9 不同间距及偏差角度下电池最大功率及填充因子

Fig. 9 Maximum power and filling factor of the cell under different spacing and deviation angle

4 结论

本文通过实验从光学特性及电学特性两方面,研究了适用于建筑集成的太阳能聚光百叶的关键设计参数:菲涅尔透镜与聚光太阳能电池接收间距、接收器宽度及允许偏差角度。对于本研究所选用的 80 mm 宽的线性菲涅尔透镜,有如下结论:

(1)当太阳光线处于无偏差入射状态时,光斑宽度会随间距不同而变化,50 mm 间距下光斑最为集中,为 2.5 mm。随着偏差角度的增大,光斑位置逐渐偏移。当太阳光线偏差角度控制在 2°及 4°以内时,光斑可分别保持在宽度为 5 mm 和 10 mm 的接收区域内;

(2)对于聚光模块的电学性能实验研究结果表明,使用砷化镓太阳能电池作为太阳能接收器时,间距在 47~53 mm 范围内,光斑均匀性对其最大功率影响不明显。偏差角度在 4°以内均可以保持较高的能量产出效率,且在 50~53 mm 间距范围内偏差角度对于产能效率的影响更小;

(3)为尽可能减少光线遮挡,实现与建筑集成“采光-产能”的平衡,选择 10 mm 宽聚光太阳能电池作为聚光百叶单元接收器,菲涅尔透镜与接收器的推荐距离为 50~53 mm,在这一范围内,聚

光百叶在 4°以内的偏差范围内均可达到较高效率。

本研究可为建筑集成用聚光组件的设计提供思路 and 参考。

参考文献 References

- [1] 武艳丽,郭庆娜,梁征,等.严寒地区展馆建筑产能设计探索与实践[J].建筑技术,2022,53(10):1340-1342.
WU Yanli, GUO Qingna, LIANG Zheng, et al. Exploration and practice of exhibition building energy production design in severe cold region[J]. Architecture Technology, 2022, 53(10): 1340-1342.
- [2] 徐伟.中国近零能耗建筑研究和实践[J].科技导报,2017,6(10):40-45.
XU Wei. China near zero energy building research practice[J]. Technology Guide, 2017, 6(10): 40-45.
- [3] 王智刚,李立,赵峰,等.关中地区公共建筑近零能耗关键技术研究[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2022,54(5):718-727.
WANG Zhigang, LI Li, ZHAO Feng, et al. Key technologies of nearly zero energy for public building in Guanzhong[J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2022, 54(5): 718-727.
- [4] 朱静,马明一,李丕,等.自然通风模式及光伏透过率对双层皮幕墙冬季运行特性影响研究[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2021,53(6):939-946.

- ZHU Jing, MA Mingyi, LI Pei, et al. Study on effect of natura ventilation mode and photovoltaic transmittance on the performance of double-skin facade in winter[J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2021, 53(6): 939-946.
- [5] VALENCIA-SOLARES M E, GIJÓN-RIVERA M, CARLOS I Rivera-Solorio. Energy, economic, and environmental assessment of the integration of phase change materials and hybrid concentrated photovoltaic thermal collectors for reduced energy consumption of a school sports center[J]. Energy and Buildings, 2023, 293, 113198.
- [6] DANIEL Chemisana. Building integrated concentrating photovoltaics: A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011, 15(1): 603-611.
- [7] DANIEL Chemisana, Ibáñez. Linear fresnel concentrators for building integrated applications[J]. Energy Conversion and Management, 2010, 51(7): 1476-1480.
- [8] NICK Novelli, KENTON Phillips, JUSTIN Shultz, et al. Experimental investigation of a building integrated, transparent concentrating photovoltaic and thermal collector[J]. Renewable Energy, 2021, 176: 617-634.
- [9] RANGA Vihari-Parupudi, HARJIT Singh, MARIA Kolokotroni. Low concentrating photovoltaics (LCPV) for buildings and their performance analyses[J]. Applied Energy, 2020, 279.
- [10] ARVIND Singhy, ROBIN Thakur, RAJ Kumar. Experimental analysis for co-generation of heat and power with convex lens as SOE and linear Fresnel Lens as POE using active water stream[J]. Renewable Energy, 2021, 163: 740-754.
- [11] LIU Xiao, WU Yupeng. Design, development and characterisation of a building integrated concentrating photovoltaic (BICPV) smart window system[J]. Solar Energy, 2021, 220: 711-734.
- [12] KATIE Shanks, ASHLEY Knowles, ADAM Brierley, et al. An experimental analysis of the optical, thermal and power to weight performance of plastic and glass optics with AR coatings for embedded CPV windows[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2019, 200: 110027.
- [13] SUN Yanyi, LIU Dingming, FLOR Jan-Frederik, et al. Analysis of the daylight performance of window integrated photovoltaics systems[J]. Renewable Energy, 2019, 145: 153-163.
- [14] 邵泽彪, 朱丽. 动态聚光建筑表皮设计与光热特性研究[J]. 建筑实践, 2019(2): 32-33.
- SHAO Zebiao, ZHU Li. Dynamic solar concentration building skin design and photo-thermal characteristics research[J]. Architectural Practice, 2019(2): 32-33.
- [15] 朱丽, 陈孟栋, 邵泽彪, 等. 建筑一体化 500 倍聚光组件光电特性实验与模拟研究[J]. 太阳能学报, 2021, 42(4): 247-252.
- ZHU Li, CHEN Mengdong, SHAO Zebiao, et al. Experimental and simulation study on optical and electrical properties of building integrated 500x solar concentrating photovoltaic module[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2021, 42(4): 247-252.
- [16] 陈海飞, 蔡宝瑞, 何文成, 等. 太阳能 CPC 聚光建筑屋顶热电性能及建筑节能的理论研究[J]. 暖通空调, 2020, 50(8): 116-122.
- CHEN Haifei, CAI Baorui, HE Wencheng, et al. Theoretical study on thermoelectric performance and building energy efficiency of solar CPC concentrating building roofs[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2020, 50(8): 116-122.
- [17] XUAN Qingdong, LI Guiqiang, ZHAO Bin, et al. Evaluation of the smart daylighting control performance of the concentrating photovoltaic/daylighting system as the skylight in the building[J]. Solar Energy, 2022, 238: 17-29.
- [18] XUAN Qingdong, LI Guiqiang, LU Yashun, et al. Daylighting utilization and uniformity comparison for a concentrator-photovoltaic window in energy saving application on the building[J]. Energy, 2021, 214: 1-13.
- [19] XUAN Qingdong, LI Guiqiang, JIANG Bin, et al. Analysis and quantification of effects of the diffuse solar irradiance on the daylighting performance of the concentrating photovoltaic/daylighting system[J]. Building and Environment, 2021, 193: 1-13.
- [20] HONG Ming, FENG Chaoqing, XU Zhao, et al. Performance study of a new type of transmissive concentrating system for solar photovoltaic glass curtain wall[J]. Energy Conversion & Management, 2019, 201(12): 112167, 1-112167, 12.
- [21] 洪铭, 冯朝卿, 郑宏飞, 等. 用于玻璃幕墙的透射式太阳能聚光系统研究[J]. 太阳能学报, 2020, 41(1): 7-13.
- HONG Ming, FENG Chaoqing, ZHENG Hongfei, et al. Study of transmissive solar concentrating system for glass curtain wall[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2020, 41(1): 7-13.
- [22] SHAO Zebiao, WANG Bo, CAO Lvpei, et al. Optical and thermal performance of dynamic concentrating solar module for building integration[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 367: 132931.
- [23] SAMUELE Memme, MARCO Fossa, Ray tracing analysis of linear Fresnel concentrators and the effect of plant azimuth on their optical efficiency[J]. Renewable Energy, 2023, 216: 119121,

(编辑 吴海西)