

· 建筑科学 ·

引用格式:杨红霞,姜瑶,何春燕,等. 陕南地区光伏遮阳板的应用研究[J]. 延安大学学报(自然科学版), 2026, 45(1): 44-50.
[YANG H X, JIANG Y, HE C Y, et al. Research on the application of photovoltaic shading panels in southern Shaanxi Province [J].
Journal of Yan'an University(Natural Science Edition), 2026, 45(1): 44-50.] DOI: 10.13876/J.cnki.ydnse.250070

陕南地区光伏遮阳板的应用研究

杨红霞¹, 姜瑶¹, 何春燕¹, 宋倩²

(1. 延安大学 建筑工程学院, 陕西 延安 716000; 2. 西安科技大学 建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 光伏遮阳板因为具遮阳节能与绿色发电双重功能, 已成为建筑光伏一体化(BIPV)的关键技术。为研究光伏遮阳系统在陕南地区的应用, 本研究根据陕南气象资料, 应用EnergyPlus和Grasshoper+Ladybug Tools软件, 模拟了光伏遮阳板在不同悬伸宽度、安装倾角下的发电量、建筑室内光环境情况。结果表明, 在陕南地区安装光伏遮阳板能提高建筑的节能率, 光伏遮阳板发电量随着安装的倾斜角度增大而增大, 而室内采光强度与之相反, 且光伏遮阳板悬伸宽度为1.5 m时发电量与照明能耗自满足率达到最大, 安装倾斜角度为30°时室内全年采光强度均达到要求。悬伸宽度1.5 m、倾斜角度30°为最佳安装方式。本研究为陕南地区办公建筑迈向“近零能耗”提供参考, 也为光伏遮阳系统推广使用提供支持。

关键词: 陕南地区; 建筑光伏一体化; 光伏遮阳; 发电量; 建筑能耗; 室内采光

中图分类号: TM615 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-602X(2026)01-0044-07

随着城市化进程加速, 建筑能耗持续攀升。据预测, 2035年全球能源消耗量较1990年将增长50%, 其中建筑能耗占比达三分之一^[1]。为实现碳达峰碳中和目标, 国务院明确提出通过建筑光伏一体化(BIPV)技术推动能源转型^[2-4]。光伏遮阳系统(PVSD)作为BIPV的重要分支, 兼具遮阳节能与发电功能, 可有效降低建筑碳排放^[5-6]。陕南地区属于亚热带季风气候, 夏季太阳高度角大、高温多雨, 建筑气候分区为夏热冬冷地区^[7], 建筑物夏季室内炎热潮湿, 空调制冷负荷巨大, 传统深挑檐水平遮阳虽能缓解建筑室内过热问题, 但缺乏能源补给功能。光伏遮阳板是一种将光伏发电技术与建筑遮阳功能相结合的一体化设计, 既实现太阳能发电, 又能调节光照强度, 实现能源生产与建筑功能的融合, 是绿色建筑和分布式能源发展的重要方向。

国内外学者和工程技术人员对不同地区建筑外窗的遮阳板的类型、安装形式、室内光环境等方面进行了研究。文献[8-11]分别从室内光环境、建筑能耗方面, 对住宅、高校实验室、办公建筑安装水平、垂直和综合等形式遮阳板的功能和设计进行了优化研究。近年, 随着光伏组件、逆变器等核心设备成本持续下降, 光伏遮阳板在建筑物遮阳领域也开始推广使用。比如, 杨芝蕊等^[12]基于EnergyPlus模型, 结合空调和照明能耗模型, 对双面光伏垂直遮阳系统进行了综合能效与参数优化研究; 李龙飞等^[13]通过模拟和实验验证设计了一种可以调节遮阳角度和高度的立面光伏遮阳系统, 应用于寒冷地区办公建筑并对其综合能耗进行了研究。本文选用Energy Plus和Grasshoper+Ladybug Tools软件, 模拟陕南地区办公建筑中不同工况下光伏遮阳板建

收稿日期: 2025-07-20

基金项目: 陕西省重点研发计划项目(2022SF-528); 延安大学科研计划项目(YAU202408622); 横向合作服务项目(ZJ2024-12-10-1)

作者简介: 杨红霞(1972—), 女, 教授, 博士, 主要从事建筑节能技术研究。E-mail: 13882869549@163.com

筑的能耗和室内光环境,探讨光伏遮阳板在陕南地区应用的可行性以及最佳安装方式。

1 建筑模型的建立

1.1 模型的选取与模拟

根据《办公建筑设计标准》(JGJ/T67—2019)^[14],通过对陕南地区办公建筑调研,选定40 m(长)×17.5 m(宽)×10.8 m(高)的三层办公建筑为基准建

筑,其围护构件构造参数见表1。按照基准建筑物相关参数,应用Sketch Up建立建筑物3D模型,如图1所示。图中模型为30个房间,房间尺寸为8 m×8 m×3.6 m,走廊长为40 m,宽为1.5 m,房间类型均为办公室。选用Energy Plus对不同工况下基准建筑物进行能耗模拟,并选用Grasshoper联动Ladybug Tools与Radiance结合Rhino对不同工况下的建筑物进行室内采光模拟。

表1 建筑围护结构构造参数

构件	材料	厚度/mm	密度/(kg/m ³)	导热系数/(W/(m·K))	比热容/(J/(kg·K))
外墙	水泥砂浆	10	1 800	0.93	1 050
	墙体保温板	30	100	0.058	1 200
	钢筋混凝土	200	2 500	1.74	1 050
内墙	水泥砂浆	10	1 800	0.93	1 050
	双层抹灰面	10	1 800	0.93	1 050
	钢筋混凝土	100	2 500	1.74	1 050
屋顶和地板	双层抹灰面	10	1 800	0.93	1 050
	钢筋混凝土	200	2 500	1.74	1 050
窗户	水泥砂浆	20	1 800	0.93	1 050
	普通白玻璃	6	2 500	0.76	820

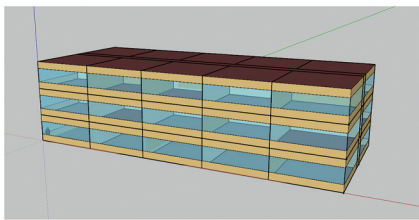


图1 基准建筑3D模型

1.2 气象参数

本研究以陕南地区建筑为模拟对象,研究所用气象参数来源于EnergyPlus官方的典型气象年数据。该数据由美国国家可再生能源实验室整合多源信息生成,包括地面气象站实测、卫星观测及再分析数据,能够反映长期气候特征^[15]。TMY数据基于超过30 a历史气象记录统计生成,是建筑能耗与可再生能源模拟中应用最广泛的气象数据集之一。因此,本研究选用TMY数据作为气象输入条件,以确保模拟结果的代表性与可靠性。

2 光伏遮阳板的安装

光伏遮阳板是一种将太阳能光伏发电技术与建筑遮阳构件相融合的复合功能系统。其核心原理在于通过一体化设计,将光伏组件作为建筑外围护结构的遮阳构件,在有效阻隔太阳辐射的同时,将捕获的光能转化为电能,从而实现遮

阳与发电功能的协同。该系统的综合能效主要体现在三个方面:发电性能、室内光环境质量以及对建筑整体节能率的贡献,其中安装方式(包括安装倾角、方位角及悬伸宽度等关键参数)是影响其室内采光效果及建筑能耗特性的决定性因素。一般来说,遮阳板的悬伸宽度越宽,发电量越多,但是过宽的悬伸宽度会影响到室内冬季的正常自然采光^[16]。

2.1 光伏遮阳板的电池参数

研究所用的光伏遮阳板均为晶体硅太阳能光伏电池,且参数设计均在EnergyPlus中的Generator Photovoltaic中设置。具体参数如下:最大额定功率为85 W,最大功率电压为96.60 V,最大功率电流为0.88 A,实验室转换效率为16%。

2.2 光伏遮阳板的安装形式

光伏遮阳板的安装形式主要有水平式、垂直式、综合式、遮挡式,如图2所示。根据实地调研结果,陕南地区建筑形态以低层为主,且立面设计中较少采用露天阳台等外挑构件。该地区夏季太阳高度角较大,太阳辐射接近天顶方向,导致大量直射光可透过外窗直接进入室内空间。因此本文选取水平式遮阳板,研究不同光伏遮阳板悬伸宽度和水平倾角对光伏遮阳效果与发电的影响。

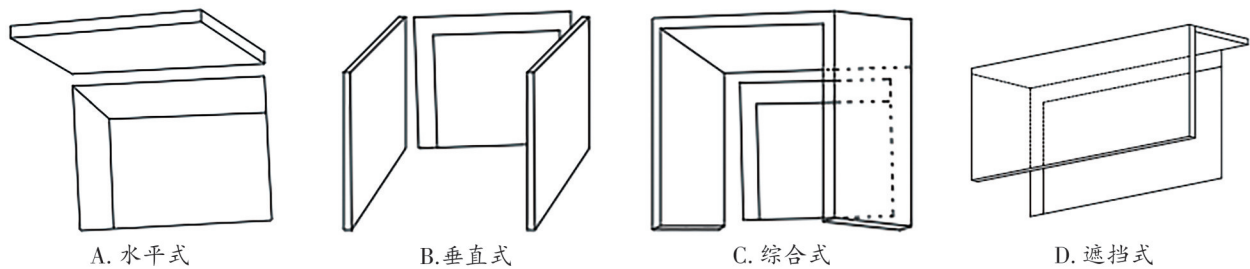


图2 光伏遮阳板的安装形式

2.2.1 光伏遮阳板的悬伸宽度

光伏遮阳板既要有效减少直射阳光进入室内,又不影响冬季采光,其悬伸宽度需结合当地太阳高度角和方位角进行动态分析确定^[17]。夏季,太阳高度角高、室外温度高,为降低室内温度、减少空调能耗,需要减少直射阳光进入室内,遮阳板悬伸宽度要大一些;冬季,太阳高度角小、室外温度低,需要更多的直射阳光进入室内、减少取暖能耗,遮阳板悬伸宽度要小一些。因此本研究选取光伏遮阳悬伸宽度分别为1、1.25、1.5 m。

2.2.2 光伏遮阳板的倾角

遮阳板的倾角是指遮阳板相对于水平窗口的倾斜角度。通常来讲,从遮阳角度出发,大倾角($30^{\circ}\sim 40^{\circ}$)可增加水平遮阳面积,适合夏季太阳高度角高的地区;小倾角($10^{\circ}\sim 20^{\circ}$),适合冬季仍需部分阳光入射的场景。从结构安全与风荷载分析角度看,低倾角($<15^{\circ}$)风荷载较小,但需注意排水和积灰问题;高倾角($>30^{\circ}$)抗风压要求高,需加强支撑结构。因此研究中选择光伏遮阳板的倾角范围为 $0^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 之间,以 10° 为间隔进行分析比较。

3 模拟计算结果及分析

研究以未安装光伏遮阳板的办公建筑为基准模型,首先对其全年能耗及室内光环境性能进行模拟分析,获取基准数据。在此基础上,于建筑外窗上方水平设置光伏遮阳板系统,通过系统调节遮阳板的悬伸宽度与倾斜角度等关键安装参数,构建多种典型工况组合,进而模拟计算各工况下系统的月均发电量、照明能耗自给率、室内自然采光强度指标及建筑节能率等关键性能参数。最终,通过对不同工况下的模拟结果进行对比分析,选取最优方案。

3.1 基准建筑全年能耗和室内光环境

建筑能耗模型的建立集成了空调与照明系统。其中,空调模型采用理想系统,室内灯光及电器设

备等相关参数参照《公共建筑节能设计标准》(GB 50189—2015)进行设定。根据基准建筑全年能耗模拟结果,其年度总能耗为287 133.24 kWh。能耗分布呈现明显的季节性特征,其中5—8月为用电高峰期,这与陕南地区夏季高温导致制冷系统负荷显著增加密切相关。此外,冬季(如12—次年1月)由于昼短夜长,人工照明时长及采暖需求相应增加,能耗亦高于春秋过渡季节,从而形成全年能耗曲线的次高峰,具体月能耗可见图3。

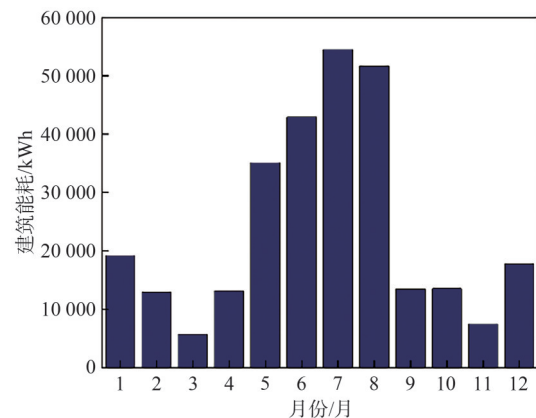


图3 基准建筑物的全年能耗

其次,根据《建筑采光设计标准》(GB 50033—2013)要求,办公室内全年自然采光强度值不应低于 300 lx ^[18],且强度为 300 lx 的面积不低于室内面积的50%。Spatial Daylight Autonomy (SDa)是一个用于评估建筑空间自然采光效果的指标^[19],表示自然光照射下,室内空间各水平照度计算点能够达到一定照度水平的的时间比例。研究采用 $SDa_{300/50\%}$ 作为室内光环境的评价指标,表示空间仅依靠自然光照射下所有水平照度计算点中在一年时间内(指空间占有时间,按一天10 h计算)超过50%的时间采光强度达到 300 lx 的百分比。基准建筑室内自然采光强度 $SDa_{300/50\%}$ 达标率为98.9%,图4为室内采光强度可视化图,全年自然采光强度自早晨8点至下午6点采光强度均在 300 lx 以上。

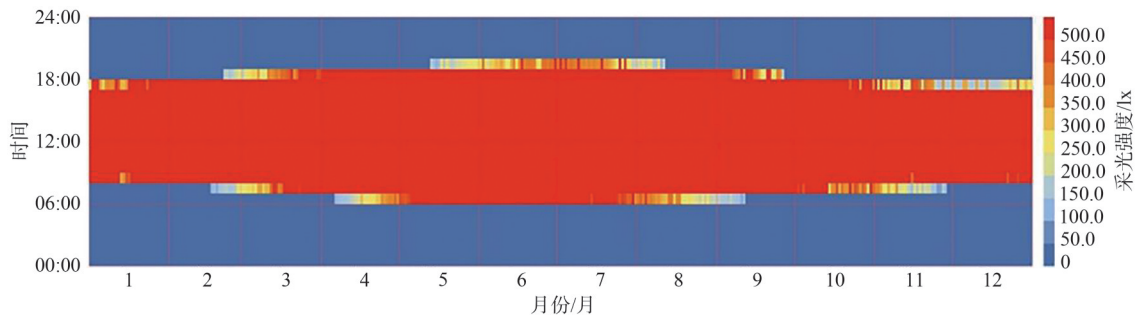


图 4 基准建筑物的全年室内采光强度可视化图

注：从 1 月 1 日至 12 月 31 日，全天 24 h，以 1 h 为间隔。

3.2 性能指标

3.2.1 发电量与照明自给率

发电量是评估光伏遮阳板发电性能的核心性能指标。通过对月发电量数据进行时序分析，能够清晰地量化其在不同月份的发电潜能，进而揭示系统发电的季节性与周期性规律。可通过式(1)计算。

$$V = S \times \eta \times I \times t, \quad (1)$$

其中， V 为月发电量(kWh)， S 为光伏板面积(m^2)， I 为光照强度(kWh/m^2)， t 为日照时长(h)， η 为光电转换效率，取 16%。

在不同工况(悬伸宽度分别为 1、1.25、1.5 m，安装倾角分别为 0° 、 10° 、 20° 、 30° 、 40°)安装光伏遮阳板时，光伏遮阳板的 1—12 月的发电量的模拟结果

如图 5 所示。由图 5 可知，在悬伸宽度一定时，光伏遮阳板的发电量随着倾角的增大而增大，且在夏季(5—8 月)时达到巅峰，当悬伸宽度为 1.5 m，倾角为 40° 时，7 月的发电量为 7 785.285 9 kWh，接近 8 000 kWh。同时，通过横向对比在倾角一定时，光伏遮阳板的发电量随着悬伸宽度的增大而增大，且倾角对光伏遮阳板的发电量的效果更为显著。由此可知，在陕南这类夏热冬冷地区，为低层办公建筑安装光伏遮阳板是一项极具潜力的技术路径。系统不仅能通过物理遮阳降低太阳辐射得热，还能直接将富裕的清洁电力回馈给建筑，实现了“主动节能”与“被动节能”的有机结合，具备良好的经济与环境效益。

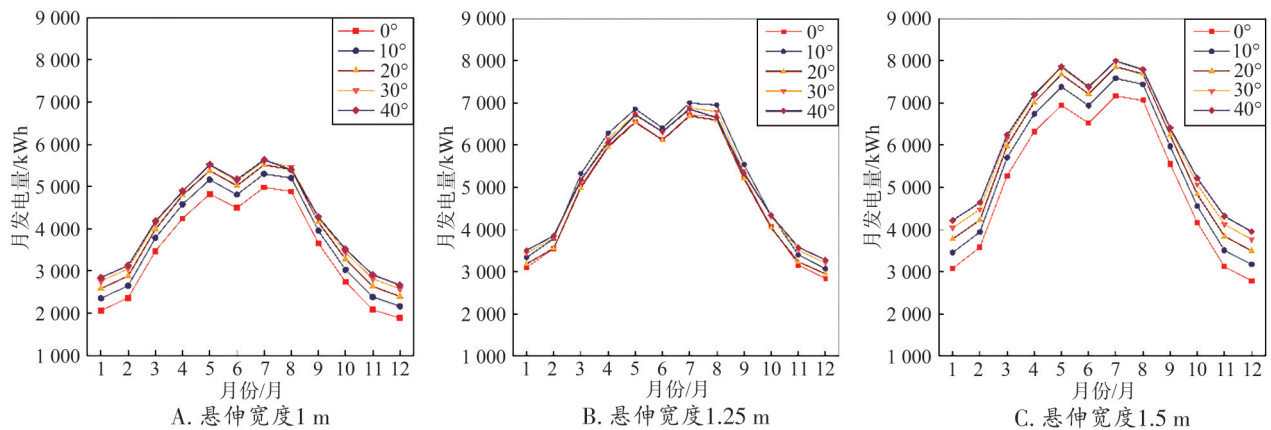


图 5 不同倾角的月发电量

照明是建筑中的持续性基础负荷。利用光伏系统所发电能为其提供电力补偿，可有效降低外部电网的购电成本。在此背景下，照明自给率是衡量光伏发电对建筑照明能耗替代程度的关键指标，其计算与分析对于评估系统实际效益具有重要意义。可以通过式(2)计算。

$$\omega = \frac{V}{E_{\text{照明}}}, \quad (2)$$

其中， ω 为照明自给率(%)， V 为月发电量(kWh)， $E_{\text{照明}}$ 为每月照明所用能耗(kWh)。

光伏遮阳板在 1—12 月期间的照明自给率模拟结果如图 6 所示，由图可知，在悬伸宽度保持不变的条件下，照明自给率随光伏板倾角的增大而呈现上升趋势，且在夏季月份达到峰值。通过纵向对比不同悬伸宽度下的性能表现，可发现随着悬伸宽度的增加，系统整体的照明自给率显著提升。当悬伸宽

度为 1.25 m 时,照明自给率自 3 月中旬至 8 月下旬均超过 100%;当悬伸宽度增至 1.5 m 时,除倾角为 0°外,其余工况下自 2 月下旬至 9 月中旬照明自给率均可维持在 100% 以上,其中在 7 月份,倾角为 40°时达到最大值 140%。表明增大悬伸宽度有助于更长的时间范围内满足建筑照明负荷需求,具备更优的能源自给性能。

但是,在冬季与春季光伏遮阳板的发电量与照

明能自给率出现了严重的下降,这与陕南地区的夏热冬冷气候吻合。陕南地区位于我国的中低纬度地区,太阳高度角春季至夏季逐渐增大,夏季至冬季太阳高度角逐渐下降。夏季,陕南地区太阳高度角大,对于建筑的直射时间比较大,所以有着不错的发电量。而冬季太阳高度角逐渐减小,且伴随着降雪天气,遮阳板可能会出现积雪情况从而影响了冬季的发电量。

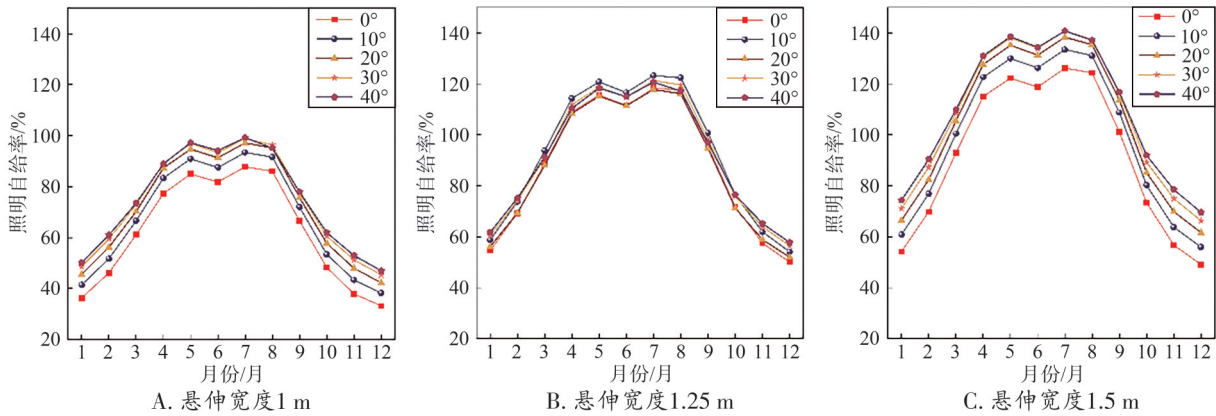


图 6 不同倾角的月照明自给率

3.2.2 室内采光达标率

为进一步评估光伏遮阳板对室内光环境的影响,本研究基于 Rhino 平台,运用 Grasshopper 构建了参数化模型,并联动 Ladybug Tools 中的 Radiance 组件,系统模拟了悬伸宽度(1、1.25、1.5 m)与倾角(0°、10°、20°、30°、40°)组合工况下的全年室内自然采光性能,模拟结果详见图 7 与图 8。根据图 7 所示,建筑室内采光达标率随光伏遮阳板安装倾角的增大呈下降趋势,且不同倾角下降幅度差异显著,倾角越大,达标率衰减越明显。结合图 8 的可视化分析进一步表明,当悬伸宽度为 1.5 m,安装倾角为 40°时,建筑在 10 月至次年 1 月期间的室内采光强度无法满足标准要求。

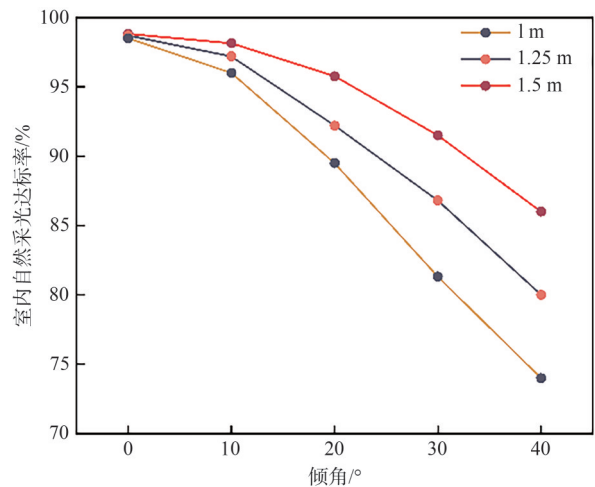


图 7 各个工况下的室内采光达标率

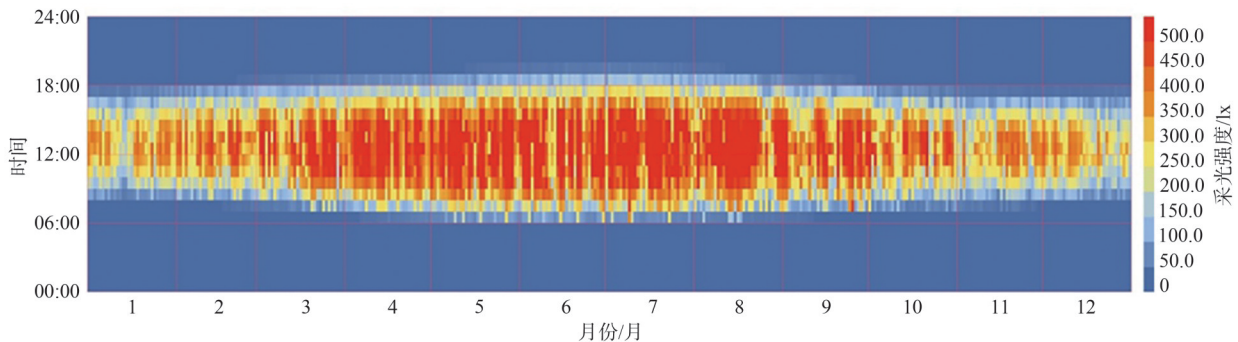


图 8 (1.5 m, 40°) 的全年室内采光强度可视化图

注:从 1 月 1 日至 12 月 31 日,全天 24 h,以 1 h 为间隔。

因此,在陕南地区,除悬伸宽度1.5 m、安装倾角40°这一极端工况在冬季出现采光不达标情况外,其余所模拟工况下的建筑室内自然采光强度均基本符合规范要求。

3.2.3 节能率

节能率是评估绿色建筑的重要指标,可以直观地反映光伏遮阳板的节能效果,可用式(3)计算^[20]。

$$E = \frac{E_1 - E_2}{E_1} \times 100, \quad (3)$$

其中, E 为节能率(%), E_1 和 E_2 分别为基准全年能耗量和实际全年能耗量(kWh)。

通过模拟计算得到建筑的年能耗,以及各个工况下的光伏发电量。分别计算出各种工况下的节能率,见图9。由图可知,在1、1.5 m的悬伸宽度下,系统的年发电量与节能率均随安装倾角的增大呈现先快速上升后趋于平缓的变化特征。当倾角增至30°与40°时,节能率的增长已不显著,数值趋近于饱和。值得注意的是,悬伸宽度为1.25 m时,节能率在倾角为20°处出现下降趋势。在悬伸宽度为1.5 m,安装倾角为40°时,节能率达到最大25.5%。

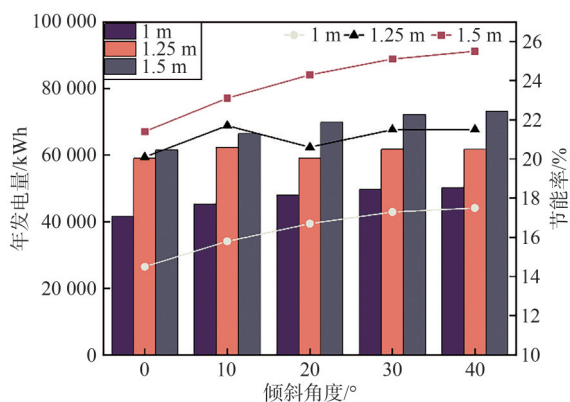


图9 各个工况下的年发电量与节能率

综上所述,光伏遮阳系统在陕南地区低层办公建筑中展现出良好的应用潜力。通过综合发电量、照明自给率及室内光环境等性能指标,确定安装参数为悬伸宽度1.5 m、倾斜角度30°的工况为最优方案。该工况能在保障室内自然采光达标的同时,实现系统能源效益的最大化。

4 结论

1) 确定了陕南地区光伏遮阳板的最优配置。光伏发电量与室内采光性能随其安装参数呈反向变化关系。最终确定悬伸宽度1.5 m、倾斜角度30°时为最佳平衡点,该配置在保障室内自然采光的同

时,实现了系统发电量最大化,达成了能源生产与建筑环境舒适的协同优化。

2) 验证了该技术在陕南地区的适用性。光伏遮阳板系统能有效降低夏季空调冷负荷,并通过发电收益直接抵消建筑能耗,是适用于夏热冬冷地区低层公共建筑的一项高效、可行的节能减碳技术,具备推广价值。

参考文献:

- [1] GHOSH A. Potential of building integrated and attached/applied photovoltaic (BIPV/BAPV) for adaptive less energy-hungry building's skin: A comprehensive review [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 276: 123343.
- [2] 中共中央国务院 关于完整准确全面贯彻新发展理念 做好碳达峰碳中和工作的意见 [J]. 石油和化工节能, 2021(6): 1-10.
- [3] 杨红霞, 何春燕, 郑海. 屋顶光伏与幕墙光伏在陕北地区建筑中的应用研究 [J]. 延安大学学报(自然科学版), 2025, 44(1): 14-19+28.
- [4] 郑海, 杨红霞. 延安市某办公建筑自然采光模拟分析 [J]. 延安大学学报(自然科学版), 2020, 39(2): 43-45.
- [5] HAO D N, QI L F, TAIRAB A M, et al. Solar energy harvesting technologies for PV self-powered applications: A comprehensive review [J]. Renewable Energy, 2022, 188: 678-697.
- [6] ALOTHMAN R T, ABDIN A R, MAHMOUD A H. The effect of using horizontal shading elements on the energy efficiency of multistory residential buildings [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2024, 1283(1): 012010.
- [7] ZHANG L, ALIZADEH A, BAGHOOLIZADEH M, et al. Multi-objective optimization of vertical and horizontal solar shading in residential buildings to increase power output while reducing yearly electricity usage [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2025, 215: 115578.
- [8] DE LUCA F, SEPÚLVEDA A, VARJAS T. Multi-performance optimization of static shading devices for glare, daylight, view and energy consideration [J]. Building and Environment, 2022, 217: 109110.
- [9] 查全芳. 水平外遮阳构件对办公建筑综合能耗的影响 [J]. 辽宁科技学院学报, 2024, 26(6): 39-44+62.
- [10] 王扬, 黄锐聪. 基于光环境仿真模拟的高校实验室竖向遮阳构件优化研究 [J]. 建筑节能(中英文), 2024, 52(6): 80-86.
- [11] 蒋新波, 马玉虎, 游泽华, 等. 遮阳方式及构造对室内自然通风的影响研究 [J]. 南华大学学报(自然科学版), 2024, 38(2): 30-37.
- [12] 杨芝蕊, 彭晋卿, 王蒙, 等. 双面光伏垂直遮阳系统综合

- 能效与参数优化研究[J]. 2023(12):9-16.
- [13]李龙飞,范征宇,刘加平.寒冷地区办公建筑立面动态光伏遮阳优化研究[J].建筑节能(中英文),2025,53(1):3-11.
- [14]中华人民共和国住房和城乡建设部.办公建筑设计标准:JGJ/T67—2019[S].北京:中国建筑工业出版社,2020.
- [15]李红莲.建筑能耗模拟用典型气候年研究[D].西安:西安建筑科技大学,2016.
- [16]MANDALAKI M,ZERVAS K,TSOUTSOS T, et al. Assessment of fixed shading devices with integrated PV for efficient energy use[J]. Solar Energy, 2012, 86(9):2561-2575.
- [17]GAO J, TANG J. Research on the performance-based parameter of horizontal visor of certain wall relative to the Sun zenith angle [J]. International Journal of Multimedia and Ubiquitous Engineering, 2016, 11(4):267-276.
- [18]中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑采光设计标准:GB 50033—2013[S].北京:中国建筑工业出版社,2013.
- [19]薛一冰,柳雯瀚.寒冷地区办公建筑外窗设计变量对室内采光及综合能耗影响研究[J].建筑技术,2023,54(7):816-819.
- [20]房文博,徐慧琳,李超.多目标下外遮阳控制策略分析:以济南地区办公建筑为例[J].建筑节能(中英文),2025,53(2):85-93

[责任编辑 张 香]

Research on the application of photovoltaic shading panels in southern Shaanxi province

YANG Hongxia¹, JIANG Yao¹, HE Chunyan¹, SONG Qian²

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Yan'an University, Yan'an 716000; 2. School of Architecture and Civil Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710054, China)

Abstract: Photovoltaic sunshades, with their dual functions of shading and energy conservation as well as green power generation, have become a key technology in building-integrated photovoltaics (BIPV). To study the application of photovoltaic shading systems in southern Shaanxi, this research utilized EnergyPlus and Grasshopper+Ladybug Tools software based on meteorological data from the region to simulate the power generation and indoor lighting conditions of photovoltaic sunshades under different overhang widths and installation angles. The results show that installing photovoltaic sunshades in southern Shaanxi can enhance the energy efficiency of buildings. The power generation of photovoltaic sunshades increases with the increase in installation angle, while the indoor lighting intensity decreases. When the overhang width is 1.5 m, the self-sufficiency rate of power generation and lighting energy consumption reaches the maximum. When the installation angle is 30°, the indoor annual lighting intensity meets the requirements. The optimal installation method is an overhang width of 1.5 m and an installation angle of 30°. This research provides a reference for office buildings in southern Shaanxi to move towards “near-zero energy consumption” and supports the promotion and application of photovoltaic shading systems.

Key words: southern Shaanxi province; building photovoltaic integration; photovoltaic shading; electricity generation; building energy consumption; indoor lighting