[文章编号] 1003－4684(2026)02-0127-05

匀光型光伏农业系统的设计与实验

白万江，吕清花，凌卓毅，赵新方，石红燕，郝佳伟
（湖北工业大学理学院，湖北 武汉 430068）

[摘 要] 随着光伏发电技术的发展，太阳能发电已成为各国改善能源结构、实现绿色发展的现实选择。传统规模的光伏项目需要大量土地，而光伏农业技术将作物种植和电力发电结合在同一块土地上，可以有效解决食品和能源生产之间土地利用竞争的问题。然而，当前光伏农业系统向植物提供的光照分布不均匀和辐射照度相对较低，影响作物正常生长。文中设计了一种圆弧形玻璃结构，实现对光线的定向分束，使光伏装置下方区域增加了约 1.6 倍的光照且光照分布均匀，实现发电的同时保障农作物的正常生长。仿真和实验结果验证了所设计的圆弧形玻璃实现均匀光线分束的可行性，同时搭建匀光型光伏农业系统，系统模拟得到每亩地发电功率 47.2 kW，预测首年发电量 51.22 MWh，年平均发电量 45.95 MWh。同时，进行甘薯种植实验，相对于在系统外种植，匀光型光伏农业系统下种植中小薯比重增加，商品薯比重增加，带来了更大的经济效益。

[关键词] 光伏农业；匀光；分布式光伏
[中图分类号] TM615 [文献标识码] A

全球人口年增长率为 0.95%，预计到 2050 年，食品需求将比 2019 年增加 50%～60%[1]。农业光伏系统可以提高土地利用效率，并实现可持续的食品和电力生产目标[2]。许多研究报告表明，光伏农业系统可以显著提高作物产量[3]。太阳能电池板通常安装在农田上方，以收集太阳能进行发电。但是这些电池板会投下阴影，遮蔽下方的作物，过度遮阴会降低作物的光合作用，影响它们的正常生长。同时太阳能电池板的布置和角度可能导致农田不同区域的日照强度不同，导致作物受光不均匀。

随着光伏农业的快速发展，涌现出一些创新技术，如集中光伏(CPV)[4]和半透明光伏技术[5]，以更好地满足作物生长的光照需求，可以在光谱[6]或区域级别[7]上实现优化，提高太阳能的利用效率和精确调控光照条件。微型 CPV 的主要缺点是大规模生产[8]和相关成本，而有机光伏(OPV)由于效率下降[9]和退化[10]，不适合大规模安装。应该对 OPV 进行额外的性能测试，以确保其与田间条件和各种作物的兼容性[11-13]。Zainali S 研究光伏阵列，分析地面遮挡条件对作物生产的影响，并通过分布分析确定特定作物和位置的农业光伏系统的最佳布局[14]。Kim S 设计了一个配备建筑一体化光伏(BIPV)的农业光伏系统，将遮挡比例设置为 30%，以最大化电力和大豆产量的利润[15]。

文中提出了一种匀光型光伏农业系统，设计了圆弧形玻璃板，实现对光线的定向分束，使光伏装置下方区域都能接收到均匀的光照。仿真和实验结果验证了所设计的圆弧形玻璃板使光伏装置下方区域增加了成倍的光照强度且光照分布均匀，同时搭建了匀光型光伏农业系统，对系统发电进行了评估，也进行了甘薯种植实验。

1 匀光型光伏农业系统的设计

1.1 匀光型光伏农业系统设计

文中提出一种利用圆弧形玻璃板提升光伏板下的光强和均匀性的匀光型光伏农业系统。通过圆弧形玻璃板可以把太阳光均匀分散至两侧被组件遮挡的阴影区域，使得光伏板下的光照均匀提升，实现光伏发电的同时光伏板下农作物的品种可选择性更多，提高农作物的品质和产量。

匀光型光伏农业系统的设计如图 1a 所示，它由金属支架、太阳能电池板和圆弧形玻璃板组成。其中，太阳能电池板与圆弧形玻璃板尺寸相同，面积以 2∶1 分配排布，用约 1/3 的圆弧形玻璃板替换了相等尺寸的太阳能电池板。这样光伏板阵列的密度与传统的光伏发电站相同，非常接近能源生产的最佳

[收稿日期] 2024-03-11
[基金项目] 国家重点研发计划项目(2023YFE0126400)；湖北省引进外国人才和智力项目(2023DJC027)
[第一作者] 白万江(1999－)，男，湖北广水人，湖北工业大学硕士研究生，研究方向为光伏技术。
[通信作者] 吕清花(1980－)，女，湖北咸宁人，湖北工业大学副教授，研究方向为光伏技术、新型光电器件检测、光电检测等。

设计。

当太阳光照射在系统表面时，圆弧形玻璃板会将接收到的太阳光散射成均匀的三部分，系统下的阴影区域将接收到均匀的光照，系统下的农作物就获得了均匀的光照。通过改变圆弧形玻璃板的玻璃材料或玻璃板表面的 AR 涂层来调整玻璃板的透射率，进一步调控照射在农作物表面的光照强度。

1.2 圆弧形玻璃板理论分析与结构设计

当光从一种介质到另一种具有不同折射率的介质时就会发生折射，具体光路和圆弧形玻璃板结构如图 1b 和图 1c 所示，①②③分别是左侧太阳能电池板、圆弧形玻璃板、右侧太阳能电池板，①②③的尺寸比例为 1∶1∶1，整个光伏装置覆盖阴影区域长度为 L，A_1、A_2 分别为圆弧形玻璃板左右两侧的入射光线，B_1、B_2 分别为圆弧形玻璃板左右两侧的出射光线，入射光线和出射光线满足斯涅尔定律，如：

$$n_1 \cdot \sin\beta = n_2 \cdot \sin(\alpha + \beta) \tag{1}$$

式中：n_1 为空气折射率；n_2 为圆弧形玻璃板折射率；α 为折射的偏转角；β 为入射角。

$$\tan\alpha = d/H \tag{2}$$

式中：d 为太阳能电池板宽度，H 为系统摆放高度。

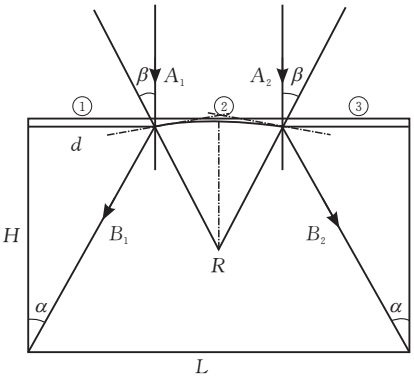
$$\sin\beta = \frac{1}{2}d \div R \tag{3}$$

式中，R 为圆弧半径。

结合太阳能电池板尺寸以及系统摆放高度，圆弧形玻璃板相关结构参数可以由公式(1)～(3)求得，根据需求来设计匀光型光伏农业系统。



(a)系统结构



(b)光路



(c)圆弧形玻璃板结构

图 1 匀光型光伏农业系统设计

1.3 圆弧形玻璃板仿真模拟

通过 SolidWorks 设计圆弧形玻璃板结构模型，并用 ZEMAX 软件进行模拟，将设计好的结构模型导入 ZEMAX 中，在 ZEMAX 中模拟匀光型光伏农业系统查验其匀光性能，仿真模拟如图 2、图 3、图 4 所示。

	物体类型	标注	参考物体	在...内部	X位置	Y位置	Z位置	倾斜X	倾斜Y	倾斜Z	材料	阵列光线条数#	分析光线条数#	能量(瓦特)	波数
1	矩形光源		0	0	0.000	0.000	-1000.000	0.000	0.000	0.000		1000	1E+06	1.000	0
2	CAD 零件: SolidWorks®	椭圆 SLDPRT	0	0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	BK7				
3	矩形体		0	0	912.000	0.000	-50.000	0.000	0.000	0.000		456.000	883.500	100.000	456.000
4	矩形体		0	0	-912.000	0.000	-50.000	0.000	0.000	0.000		456.000	883.500	100.000	456.000
5	矩形探测器		0	0	-912.000	0.000	5550.000	0.000	0.000	0.000		456.000	1000.000	100	100
6	矩形探测器		0	0	0.000	0.000	5550.000	0.000	0.000	0.000		456.000	1000.000	100	100
7	矩形探测器		0	0	912.000	0.000	5550.000	0.000	0.000	0.000		456.000	1000.000	100	100

图 2 编辑窗口

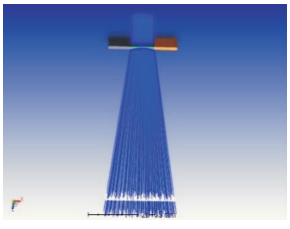


图 3 实体模型

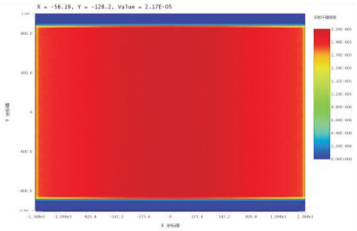
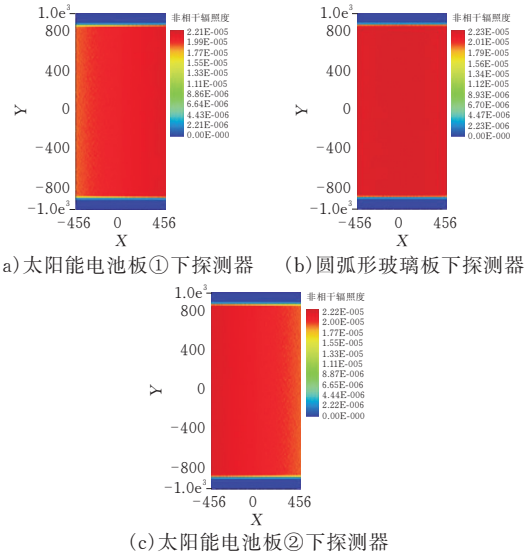


图 4 探测器结果

由实体模型和探测器示意图可以清晰表明，探测器接收到均匀的光照。设置 3 个探测器分别测量两块太阳能电池板以及中间圆弧形玻璃板下方光照接收情况，进一步查看系统下方各区域接收光照情况，设置光源能量为 1 W，探测器接收情况如图 5 所示。

由图 5 可知，太阳能电池板①下探测器接收到的能量约为 0.325 W，圆弧形玻璃板下探测器接收到的能量约为 0.346 W，太阳能电池板②下探测器接收到的能量约为 0.325 W，包含设计误差在内各区域能量差异仅约 2%(仅占整个系统光照总量)，圆弧形玻璃板通过定向分束光线，使得光伏装置下方农作物可以接收到均匀的光照，避免了阴影和不



(a)太阳能电池板①下探测器　(b)圆弧形玻璃板下探测器

(c)太阳能电池板②下探测器

图 5　分区域探测器结果示意图

均匀光照对农作物生长的影响。这样的优化措施可以改善农作物的光环境，增加农作物产量并改善产品品质。

1.4　圆弧形玻璃板匀光性测试

对圆弧形玻璃板匀光性进行测试。根据表 1 中呈现的测试结果，观察到在没有圆弧形玻璃板的情况下，只有 12%～15%的太阳辐射能够到达模块的阴影部分。然而，添加圆弧形玻璃板后，总太阳强度增加了大约 19%。测试显示，在加入圆弧形玻璃板后，原始阴影区域的光强度增加了 1.6 倍。这表明圆弧形玻璃板有效地增加了到达光伏装置下方农作物的光照强度。

表 1　圆弧形玻璃板匀光性测试结果　%

光伏组件结构	左部分太阳能电池板下方光强分布	中间匀光玻璃板下方光强分布	右部分太阳能电池板下方光强分布
纯太阳能电池板组件	12	12	12
加圆弧形玻璃板后光伏组件	31	34	31
增加的透光率	19	22	19

总体而言，圆弧形玻璃板显著改善了太阳能的利用，并增加了到达阴影区域的光照强度。

2　匀光型光伏农业系统的研究

2.1　匀光型光伏农业系统的搭建

对整个匀光型光伏农业系统进行搭建，光伏组件选择 8 块 375 W－37 W－12 A 的太阳能电池板，分成两组 4 块串联，两组并联，通过使用 MPPT 充电一体机实时监测太阳能发电情况，配合正弦波逆变器进行高效电流转换，结合 2.4 kWh 锂电池作为能量存储设备，以及双面光伏组件和圆弧形玻璃板的设计，构建了一个高效且可靠的太阳能发电系统。这个系统能够最大程度地利用太阳能资源，并将其转化为清洁、可再生的电能，匀光组件如图 6 所示，系统如图 7 所示。

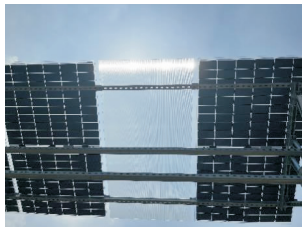


图 6　匀光组件



图 7　匀光型光伏农业系统

2.2　系统匀光性测试

在测量光照均匀性时将一组匀光型光伏组件如图 8 所示区域划为三大块，再将每块照射面平均分为 9 个区域，总共 27 个测试区域。文中使用植物光照分析仪 PLA-30 测试各个区域。

测试结果如表 2 所示，各个测试点均光照强度几乎接近，由此可见匀光型光伏农业系统有很显著的匀光效果。



(a)测试区域

1	4	7
2	5	8
3	6	9

(b)区域划分

图 8　照明均匀性测量

表 2　实地匀光型光伏农业系统匀光性测试结果

PPFD:umol/m²/s

测试点	板(左)	板(中)	板(右)
1	755.0	761.3	777.4
2	770.6	758.6	780.3
3	775.5	759.6	772.6
4	778.4	760.5	783.5
5	780.2	758.4	784.3
6	776.9	768.5	782.4
7	774.9	769.8	772.6
8	770.4	756.6	779.9
9	755.6	770.3	766.3
平均值	770.8	762.6	778.1

2.3　系统发电评估

通过 PVsyst 对匀光型光伏农业系统进行发电量模拟预测。光伏电池组件选用天合组件单晶硅 TSM-655DEG21C.20，标称功率是 655 W，尺寸是 2.384×1.303 m²，开路电压是 45.70 V，短路电流是 18.40 A。电池组件采用 2×3 组并联，19 组串联的形式连接，共计 114 组。逆变器选用阳光电源

SG80KTL，数量为 1 台，输出电压为 400 V，标称交流功率为 80 kW，相关参数见图 9。



(a)光伏电池组件参数



(b)逆变器参数

图 9 组件参数

地址定在武汉(纬度 30.62°N，经度 114.13°E)，海拔 23 m，时区 UTC+8，固定倾角/方位角 30/0°，故整体模拟为固定角度阵列。光伏阵列南北间距 5.5 m，东西间距 5.5 m，整体布局见图 10。

根据上述获得数据，结合发电量损失因素，用 PVsyst 软件进行模拟，获得发电结果。根据实际太阳能电池板与圆弧形玻璃板的排布，匀光型光伏农业系统的装机总容量为 47.2 kW，第一年的发电量为 51.22 MWh，根据模拟可得电站 25 年总发电量为 1148.75 MWh，前 10 年发电量为 493.42 MWh，年均发电量为 45.95 MWh。

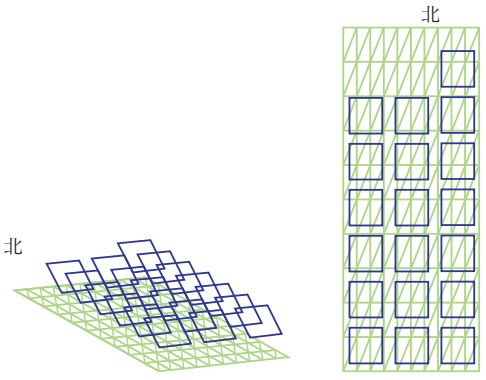


图 10 光伏阵列布局

2.4 种植与结果分析

以食用型甘薯 17 为试验材料，EG 表示在匀光型光伏农业系统下种植(实验组)，CK 表示系统外种植(对照组)。种植实验如图 11 所示。



图 11 种植实验

根据重量来区分大中小薯，种植结果如表 3 所示。根据表 3 种植结果可以得出，相对于在系统外种植，匀光型光伏农业系统下种植，中小薯比重增加，即商品薯比重增加，带来了更大的经济效益。

表 3 甘薯种植结果

处理	大薯(>500g)		中薯(100—500g)		小薯(<100g)		区域产量及其构成因素			
	数量/个	重量/kg	数量/个	重量/kg	数量/个	重量/kg	总数量/个	总重量/kg	单株结薯数	单薯重量/g
CK17	30	20.95	29.00	7.81	10.00	0.94	69.00	29.70	1.53	430.36
EG17	20.5	14.96	44.50	12.60	13.50	0.70	78.50	28.26	1.74	360.03

3 结论

文中基于圆弧形玻璃设计了一种匀光型光伏农业系统，实现了对光线的定向分束，使光伏装置下方区域增加了 1.6 倍的光照且光照分布均匀，实现发电的同时保障了作物的正常生长。仿真和实验结果验证了所设计的圆弧形玻璃板实现均匀光线分束的可行性。搭建了匀光型光伏农业系统，仿真模拟得到每亩地功率 47.2 kW，预测首年发电量 51.22 MWh，年平均发电量 45.95 MWh；进行了甘薯种植实验，实验表明，相对于在系统外种植，匀光型光伏农业系统下种植中小薯比重增加，商品薯比重增加，带来了更大的经济效益。该系统在农光互补系统的实际应用中具有巨大的潜力，有助于推动太阳能发电和农业生产的协同发展。

[参 考 文 献]

[1] FALCON W P, NAYLOR R L, SHANKAR N D. Rethinking global food demand for 2050[J]. Population and Development Review, 2022, 48(04): 921-957.

[2] CHAE S H, KIM H J, MOON H W, et al. Agrivoltaic systems enhance farmers' profits through broccoli visual quality and electricity production without dra-

matic changes in yield, antioxidant capacity, and glucosinolates[J]. Agronomy, 2022, 12(06): 1415.
[3] TROMMSDORFF M, KANG J, REISE C, et al. Combining food and energy production: Design of an agrivoltaic system applied in arable and vegetable farming in Germany[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 140: 110694.
[4] SATO D, YAMADA N. Design and testing of highly transparent concentrator photovoltaic modules for efficient dual-land-use applications[J]. Energy Science & Engineering, 2020, 8(03): 779-788.
[5] LIU W, LIU L, GUAN C, et al. A novel agricultural photovoltaic system based on solar spectrum separation[J]. Solar energy, 2018, 162: 84-94.
[6] YANG F, ZHANG YE, HAO Y, et al. Visibly transparent organic photovoltaic with improved transparency and absorption based on tandem photonic crystal for greenhouse application[J]. Applied Optics, 2015, 54(34): 10232-10239.
[7] LI Z, YANO A, COSSU M, et al. Shading and electric performance of a prototype greenhouse blind system based on semi-transparent photovoltaic technology [J]. Journal of Agricultural Meteorology, 2018, 74(03): 114-122.
[8] DOMÍNGUEZ C, JOST N, ASKINS S, et al. A review of the promises and challenges of micro-concentrator photovoltaics.[C]// AIP conference proceedings. AIP Publishing, 2017.
[9] DISTLER A, BRABEC C J, EGELHAAF H J. Organic photovoltaic modules with new world record efficiencies[J]. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2021, 29(01): 24-31.
[10] ÖNER V, YILMAZ EÇ, YESILYURT MK, et al. Operational stability and degradation of organic solar cells[J]. Periodicals of Engineering and Natural Sciences, 2017, 5(02).
[11] CROCE R, VAN AMERONGEN H. Natural strategies for photosynthetic light harvesting[J]. Nature Chemical Biology, 2014, 10(07): 492-501.
[12] MASSA G D, KIM H H, WHEELER R M, et al. Plant productivity in response to LED lighting[J]. Hort Science, 2008, 43(07): 1951-1956.
[13] MARUCCI A, CAPPUCCINI A. Dynamic photovoltaic greenhouse: Energy efficiency in clear sky conditions [J]. Applied Energy, 2016, 170: 362-376.
[14] ZAINALI S, LU SM, STRIDH B, et al. Direct and diffuse shading factors modelling for the most representative agrivoltaic system layouts[J]. Applied Energy, 2023, 339: 120981.
[15] KIM S, KIM S. Design of an grivoltaic system with building integrated photovoltaics [J]. Agronomy, 2023, 13(08): 2140.

Design and Experimentation of Uniform Light Type Photovoltaic Agriculture System

BAI Wanjiang, LV Qinghua, LING Zhuoyi, ZHAO Xinfang, SHI Hongyan, HAO Jiawei
(*School of Science, Hubei Univ. of Tech., Wuhan* 430068,*China*)

Abstract: In recent years, with the development of photovoltaic power generation technology, solar power generation has become a realistic choice for countries to improve their energy structure and achieve green development. Traditional large scale photovoltaic projects require large amounts of land, limiting the use of agricultural land. Photovoltaic agricultural technology combines crop cultivation and electricity generation on the same land, which can effectively solve the problem of land use competition between food and energy production. However, the current photovoltaic agricultural system provides uneven light distribution and relatively low radiation intensity to plants, which affects the normal growth of crops. In this article, an arc-shaped glass structure is designed to achieve directional splitting of light, which increases the amount of light in the area below the photovoltaic device by about 1.6 times and distributes the light evenly, achieving power generation while ensuring the normal growth of crops. The simulation and experimental results verified the feasibility of the designed arc-shaped glass to achieve uniform light beam splitting. At the same time, a uniform light photovoltaic agricultural system was built. The system simulation obtained a power generation power of 70.8W per square metre of land, and the predicted power generation in the first year was 51.22MWh. The average annual power generation is 45.95MWh. What is more, a sweet potato planting experiment was conducted. Compared with planting outside the system, planting under a uniform light photovoltaic agricultural system has increased the proportion of small and medium-sized potatoes and the proportion of commercial potatoes, bringing greater economic benefits.

Keywords: photovoltaic agriculture; uniform light; distributed photovoltaic

[责任编校: 闫　品]