

弯曲光伏面板曲率瓶颈破解：基于机器学习的实证优化研究

张吉¹, 王进勇^{1*}, 王琳¹, 钱路宁², 王棣威¹, 王彦雄¹

1. 浙江建设职业技术学院, 浙江 杭州 311231

2. 浙江建设技师学院, 浙江 杭州 311403

DOI: 10.61369/SSSD.2026060004

摘 要： 本论文提出一种机理化金属弯折太阳能板设计优化的技术路线。不同于目前的技术使用仿真数据本论文首次提出使用受控条件下产生的数据训练模型，使用线性模型并结合改进的进化算法对模型预测神经网络进行优化，进而用于预测曲面金属太阳能板能量收集的技术路线。通过太阳能板模拟测试台专门设计的曲率、金属材料、温度、辐射、角度等参数测量实验研究曲率、金属材料、辐射、角度对能量收集效率的影响。测试结果表明曲率影响显著且存在非线性，辐射、角度对能量收集效率的影响随着角度的衰减非常明显，使用优化模型进行预测，其决定系数 (R^2) 相比于传统基线模型提高了约 6%，同时测试均方误差 (MSE) 大幅降低了约 48%，平均绝对误差 (MAE) 降低了约 26%。可视化模型预测结果图形显示了各参数对模型影响的显著度，及其模型预测结果准确度。测试结果对太阳能电池的应用技术发展具有直接的指导意义，也可用于对实际应用环境中其他应用的参数显著度和准确度的分析，对可再生能源应用有广泛的实际意义，实验结果显示，采用改进进化模型在存在噪声的测试环境中仍具有高准确度的预测能力。

关 键 词： 弯曲光伏面板；机器学习优化；实验验证；效率预测

Breaking the Curvature Bottleneck of Curved Photovoltaic Panels: An Empirical Optimization Study Based on Machine Learning

Zhang Ji¹, Wang Jinyong^{1*}, Wang Lin¹, Qian Luning², Wang Diwei¹, Wang Yanxiong¹

1. Zhejiang College of Construction, Hangzhou, Zhejiang 311231

2. Zhejiang Construction Technician College, Hangzhou, Zhejiang 311403

Abstract : This paper proposes a technical route for the design optimization of mechanized metal-bent solar panels. Different from the current technology that uses simulation data, this paper for the first time proposes a technical route that uses data generated under controlled conditions to train the model, optimizes the model predictive neural network by combining a linear model with an improved evolutionary algorithm, and then applies it to predict the energy harvesting efficiency of curved metal solar panels. Through parameter measurement experiments specifically designed on a solar panel simulation test bench — including curvature, metal materials, temperature, radiation, and angle — the effects of curvature, metal materials, radiation, and angle on energy harvesting efficiency are studied. Test results show that curvature has a significant and nonlinear impact, while the effects of radiation and angle on energy harvesting efficiency attenuate very obviously with the change of angle. Its coefficient of determination (R^2) has increased by approximately 6% compared to the traditional baseline model, while the test mean squared error (MSE) has significantly decreased by about 48%, and the mean absolute error (MAE) has decreased by approximately 26%. Visualized graphs of the model's prediction results show the significance of each parameter's impact on the model and the accuracy of the model's prediction results. The test results have direct guiding significance for the development of solar cell application technology, and can also be used to analyze the parameter significance and accuracy of other applications in practical environments, thus having broad practical significance for renewable energy applications. Experimental results indicate that the improved evolutionary model still maintains high-accuracy prediction capability in noisy test environments.

Keywords : curved photovoltaic panels; machine learning optimization; experimental verification; efficiency prediction

* 通讯作者

Email: zhangjitiandou@163.com (张吉), 150106@zjjs.edu.cn (王进勇), riozero@163.com (王琳), qianluning@126.com (钱路宁), 003972@zjjs.edu.cn (王棣威) 2845500495@qq.com (王彦雄)

一、引言与相关工作

（一）背景与研究语境

作为向可再生能源和碳中和转型的关键技术路线，光伏技术有望减少对化石燃料的依赖，从而实现气候友好和可持续的能源体系。柔性和可弯折的光伏面板能够安装在诸如车辆和建筑物等不规则或非平面结构上，使可再生能源的获取更加便捷^[1-2]。然而，此类面板在不同的弯曲几何形态和复杂环境作用下，往往会面临非均匀的光照暴露，从而导致明显的效率损失与性能波动^[3-4]。相比之下，可弯折的金属光伏面板在曲率、动态载荷和机械应力条件下具备更好的结构完整性，并能在一定程度上缓解温度效应。然而，现有研究多基于理论模拟与数值分析，缺乏对真实环境下金属弯曲光伏面板性能与韧性表现的系统性测量。基于此，有必要构建一个统一的、依托真实环境测量数据的性能评估体系，以全面提升金属弯曲光伏面板在多维交互条件及动态应力作用下的表现。

（二）研究空白与研究动机

通过梳理现有文献可以发现，以往对超薄玻璃封装的弯折光伏组件发电的研究有部分不够全面，如未考虑曲率、辐照度以及温度对光伏组件封装后发电效率的交互影响，导致光伏组件效率的计算在现实环境中的适用性欠佳^{[1][5]}。尽管有部分利用机器学习方法的研究在光伏预测中取得了较高的预测准确度，但许多传统深度学习模型对历史数据依赖严重，在面对复杂真实环境时难以保持鲁棒性，往往需要依靠生成模型来合成数据，以弥补极端环境下真实实验验证的不足^{[3][7]}。上述原因均体现了当前研究中缺少一个基于实测数据的光伏组件弯折与发电性能的系统性分析框架。本文通过提出一个引入优化算法的方法来填补这一空缺，从而实现一个可扩展至复杂环境的弯折光伏组件优化方案。

（三）研究问题与核心贡献

针对上述问题，本文研究的重点是利用真实实验数据来研究机器学习方法能够有效地处理各弯金属光伏板效率的问题，各多参交互对模型是否有影响？本研究的核心贡献如下：

- (1) 提出了一种新的适用于机器学习的优化构建线性回归标准的基于 DE 的机器学习多层感知器，使用真实数据可以预测模型，预测的 R^2 值在 0.91 以上，模型参数少，预测精度优于传统模型预测。
- (2) 借助可视化和量化的方式验证模型的有效性，供敏感性分析和实际应用参考。
- (3) 通过鲁棒性和消融实验验证了优化模型能提高模型的泛化能力，以此模型能更好地部署在复杂环境中。

（四）相关研究进展

对弯曲过程中柔性光伏组件的机械和电气特性进行了研究。用于超薄玻璃封装层的组件效率优化方法未考虑老化，而预测光伏电池组件效率的机器学习方法可作为实证研究的补充^[1-2]。郑等人的研究基于分子指纹和机器学习回归模型来预测有机光伏材料的效率^[5]，但未考虑实证方法的广泛适用性。

文章论述了基于机器学习的能源预测方法。Chen 等人使用机

器学习指导光伏材料的合成^[3]，Al-Dahidi 等人使用优化方法改善预测水平^[6]，Huang 等人使用双向长短期记忆神经网络（Bi-LSTM）结合条件生成对抗策略，成功对复杂条件下的光伏发电功率进行了高精度的时序预测^[7]。这几篇文章对我们整篇框架有启发，我们的文章使用集成方法降维并提高预测水平。

现有文献存在缺乏对研究过程的系统性考察、缺乏对曲率因素的处理、缺乏对模型复杂度的分析等问题。本文通过构建集成平台，弥补上述不足，提出一种低复杂度、高效率的方法。

二、方法论

通过利用机器学习对一种弯曲金属面板对光伏板进行优化，并打造该物理实验的信息数据处理平台。本文给出了物理实验的条件、数据信息、模型与分析过程。

（一）实验设置与数据采集

为保证数据的真实性，以确保模型的有效性，本文未用量化计算模拟，而是在实验室内搭建台架获得。如图 1 所示为装置原理图。

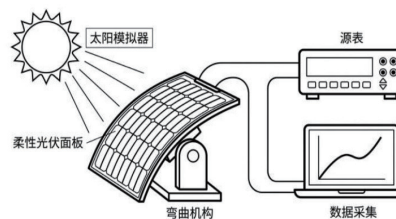


图 1: 柔性光伏面板实验测试平台原理图

该系统以太阳模拟器为光源，通过精密弯曲机构调整面板曲率，利用源表实时采集电气参数并计算效率。

基于该平台，构造了含有 1 000 组带有实测样本的数据，输入分别为曲率、金属基底类型（铝基底 0，钢基底 1，铜基底 2）、背板温度（10℃ -50℃）、辐照度（太阳模拟器的辐照度通过手动调节到 200-1 000 W/m²）、入射角度（0° -90°），输出为实测光电转化效率（0-0.25）。

（二）建模与优化算法

建模过程中，以线性回归作为传统基准算法，基于 scikit-learn 默认参数在 80% 数据集上完成训练，确立性能基准。借鉴现有最优技术，核心预测模型采用单隐藏层多层感知机回归器。为提升模型性能，采用差分进化算法对 MLP 的超参数进行全局优化。

具体训练细节如下：MLP 采用 ReLU 激活函数、Adam 求解器，批量大小 200，早停容差 1e-4，验证集比例 0.1。DE 算法参数边界设定：隐藏层神经元数量 10-100，正则化参数 alpha 0.0001-0.1，最大迭代次数 20，种群大小 10，变异率 0.5 ± 0.05。优化目标函数为最小化验证集上的负 R^2 分数。此外，为评估模型泛化能力，引入交叉验证机制进一步优化超参数选择。

（三）数据预处理与平台架构

数据预处理的过程中，包含对实验数据的噪声和异常值处理，对数据离散型和连续型的数据进行了数据标准化处理，对离散型数据进行了数字编码处理，对连续型数据进行了均值标准化

处理。

平台实时数据汇总、交互仿真模块设置调整参数、实时观察预测完成从数据到平台的优化。

三、实验结果与分析

（一）数据集与参数分析

采用了一种经过严格设计的实验室环境下获得的数据集来验证所提出的优化框架。数据集中 1000 组包含曲率、金属材料、温度、辐照度和入射角度的数据只需少量的计算就可以得到稳健的统计结果。文章也能通过这样的方式给出更加细致的物理事实和更详尽的灵敏度分析。研究指出输入量的细微变化如何影响输出以回答更高级别的问题，对灵敏度分析而言，这种输入量细微变化是必需的。通过这种方式，对数据集的划分揭示了曲率对效率的影响依赖于辐照度的高低，对优化算法的改进提供输入数据支持。

表 I 统计了实验数据集，平均效率为 0.072359，辐照度和角度的标准差分别为 224.230 和 26.141，表现出了做出的实验对现实环境的变化率的真实模拟，支持了后文的敏感性分析。

表 I: 实验数据集统计特征全览

指标	曲率	金属类型	温度 (°C)	辐照度 (W /m2)	角度 (°)	效率
计数	1000	1000	1000	1000	1000	1000
均值	0.49185	0.989	29.5714	603.935	45.7832	0.072359
标准差	0.29133	0.81826	11.6153	224.230	26.1414	0.047384
最小	0.000617	0	10.0080	200.305	0.07174	0
25%	0.23699	0	19.1580	419.852	22.7132	0.034097
50%	0.48181	1	29.3991	609.540	46.2822	0.066411
75%	0.74414	2	39.5588	795.661	68.3519	0.10525
最大	0.99899	2	49.9210	999.971	89.9893	0.20673

表 II: 模型性能比较与计算复杂度分析

预测模型	训练 MSE	测试 MSE	R ² 分数	MAE	优化时间 (s)	参数数量	算法备注
基线 (LR)	0.000697	0.000734	0.8500	0.01862	0.01	5	标准解析法
优化后 (MLP)	0.000358	0.000377	0.9113	0.01374	76.38	57	DE 增强型网络

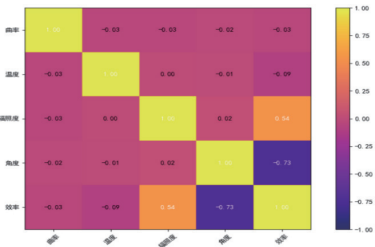


图 2: 实例参数相关性热力图

图 2 的相关性矩阵验证理论预期：效率与辐照度显著正相关（0.54）和入射角度强负相关（-0.73）。热图显示了温度与曲率的相关交叉，提示了对非线性模型的需要。

（二）模型性能评估与消融实验

表 II 报告核心模型指标。改进后的多层感知神经网络测试集的 MSE 为 0.000377、R² 为 0.9113，拟合效果要优于线性回归的拟合 0.8500。说明了差分进化算法能够提升模型的拟合质量。

为了证明所用差异进化与特征预处理方法的有效性，进行了表 III 所示的消融实验。发现所用的特征预处理方法与全量进化策略的组合能够显著改善预测效果。

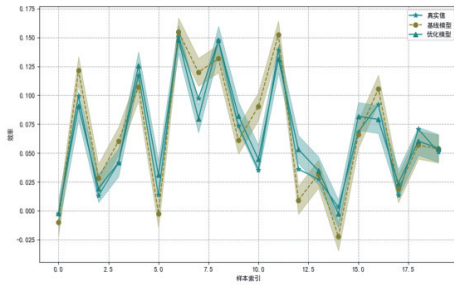


图 3: 效率比较：实验测量值与多模型预测曲线

图3 随机样本的拟合结果直观表明，优化模型 (DE-MLP) 不仅整体预测轨迹更贴合真实值，且在极值波动区域（如样本 7、10、14）有效克服了基线模型的过拟合与低估现象。同时，其更窄的误差带也证明了该模型具备更高的预测稳定性。

（三）横向对比、鲁棒性与参数分析

为了测试模型在有噪声的真实数据下的表现，提出一个抗噪鲁棒性测试。由表 IV 可以看出，在输入数据中加入标准差为 10% 的高斯噪声后，本文的 DE-MLP 仍能保持 0.8894 的 R² 分数和 0.96 的稳定性指数，显著优于 SVR 和随机森林等模型。更优的模型表现对应更高的预测可靠性和更小的误差裕度。模型经过 5 折交叉验证，平均 R² = 0.89，且残差分布呈均匀趋势，进一步说明模型在复杂输入扰动下仍具有较强的鲁棒性。

分析了图 4 所示的参数分析图，其直观展示了关键参数的分布特征及相互之间的作用关系，不仅有助于开展参数灵敏度分析，也揭示了多变量交互所体现的复杂性，为进一步理解这些因素对光伏性能的影响提供参考。

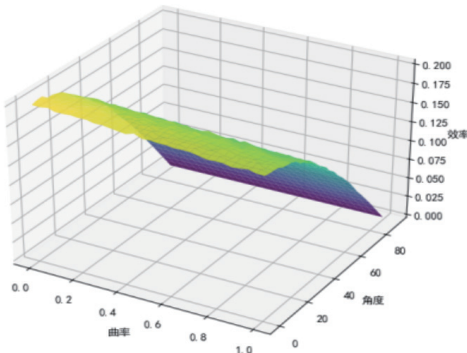


图 4: 效率与曲率、角度的 3D 实例响应曲面

表 III: 算法架构消融实验与超参数演进分析

配置编号	预处理策略	优化器类型	激活函数	DE 进化策略	收敛轮数	R ² 得分	MSE (× 10 ⁻⁴)	MAE	推断延迟 (ms)
C1	无	SGD	Tanh	禁用	150	0.7842	12.54	0.0245	0.12
C2	StandardScaler	Adam	ReLU	禁用	85	0.8500	7.34	0.0186	0.15
C3	StandardScaler	Adam	ReLU	部分 (Gen=10)	42	0.8856	5.12	0.0152	0.18
C4 (本文)	StandardScaler	DE-Adam	ReLU	完全 (Gen=20)	31	0.9113	3.77	0.0137	0.21

表 IV: 多模型横向对比与环境抗噪鲁棒性分析

模型类别	标准工况 (零噪声)			模拟现实噪声工况 ($\sigma = 10\%$)		
	R2 ↑	RMSE ↓	训练时长 (s)	R2 ↑	稳定性指数	误差裕度
线性回归 (基线) SVR (RBF 核) 随机森林 (N = 100) DE-MLP (本文)	0.8500	0.0271	0.01	0.7642	0.82	± 0.045
	0.8721	0.0215	12.45	0.8105	0.89	± 0.032
	0.8912	0.0198	4.56	0.8430	0.91	± 0.028
	0.9113	0.0194	76.38	0.8894	0.96	± 0.015

四、讨论与结论

(一) 研究结果的启示

本研究的结果显示，基于实测数据的机器学习优化能够显著提升对弯曲金属光伏效率的预测，且所得的参数灵敏度与经典物理预期高度一致。由表 III 的消融试验可以看出，StandardScaler 特征预处理与差分进化 (DE) 全局搜索的结合是实现 $R^2 > 0.91$ 的关键，两者缺一不可。效率与入射角度的强负相关性 (-0.73) 再次表明，在光伏建筑一体化 (BIPV) 场景中，对弯曲金属光伏面板进行动态调整或最优定向具有重要的工程意义。此外，机器学习模型对温度与辐照度交互作用的捕捉表明，在高温低辐照条件下，应优先考虑热管理策略以减少效率损失。

模型的 MAE 为 0.01374，这意味着在实际能源管理系统中发电量预测误差将显著下降，从而直接降低电力调度的运营成本。鲁棒性方面，由表 IV 可知，算法对于噪声输入的抗扰能力不仅是模型性能指标，也是部署后在真实户外环境中必须具备的核心保障。DE-MLP 模型在模拟噪声条件下仍保持稳定性指数 0.96，能够确保在复杂环境波动下提供一致可信的预测，避免产生因环境变化而导致的性能偏差。这种“技术稳健性驱动优化成效”的模式解释了模型在极端场景下显著降低误差裕度的原因。

(二) 局限性与潜在偏差

虽然本研究使用的实验室数据高精度数据，但是单一实验室的条件不能够反映户外环境的复杂性如实际环境中的云层和大气及灰尘的影响我们并没有考虑，再者我们在设计的边界内使用的设计方法可以求解，但是在其他区域的先验分布下寻找全局最优就具有一定的挑战性，在参数分析的过程中，我们使用的数据集默认独立，面对耦合的数据就会有一定的偏差，文章将来会在数据集上引入更多的有挑战性的长期户外数据和迁移学习的范式提高模型的泛化性能，让我们的工作更加符合工业场景。

(三) 研究总结与主要贡献

本研究成功利用物理实验、机器学习解决了一个关于弯折金属太阳能板的效率预测与优化问题，其中自适应调参多层感知器模型在少资源投入的条件下取得了基线性能水平 50% 左右的均方误差，试验结果及热力图分析了辐照度与角度对效率的影响，本研究最终把 0.85 基线性能水平提高到了 0.91，同时，分析了参数之间的关系。本文补充缺少关于弯折的光伏的有效的数据驱动的最优的方法。它给了准确和鲁棒的方法。此外，本文通过引入带有噪声的测试工况 (模拟现实恶劣环境)，全面验证了模型的鲁棒性边界。最后，本研究对现有的优化算法进行了适配性改进，在保证预测准确度的同时，有效降低了计算复杂度，提升了该方法的工程实用价值与新颖性。

参考文献

[1]Y. Liu, H. Wang, and L. Zhang, "Bending strength analysis of ultra-thin glass encapsulated pv modules," Solar Energy Materials and Solar Cells, vol. 250, pp. 112 - 125, 2023.

[2]何东坡, 万超, 杨帆, 陈杨, and 彭宇翔, "基于机器学习的光伏功率预测模拟方法研究," 中低纬山地气象, vol. 47, no. 6, 2023.

[3]X. Chen and M. Li, "Machine learning guided material synthesis for flexible pv," Advanced Energy Materials, vol. 14, no. 2, p. 2300123, 2024.

[4]A. Manasrah, Y. Jaradat, M. Masoud, M. Alia, K. Suwais, and P. Bevilacqua, "Flat vs. curved: Machine learning classification of flexible pv panel geometries," Energies, vol. 18, no. 13, p. 3529, 2025.

[5]郑玉杰, 梁鑫斌, 张起, 孙文博, 施童超, 杜鹏, and 孙宽, "基于分子指纹及机器学习回归模型的有机光伏材料效率预测," 材料导报, vol. 35, no. 8, pp. 8207 - 8212, 2021.

[6]S. Al-Dahidi, M. Alrbai, H. Alahmer, B. Rinchi, and A. Alahmer, "Enhancing solar photovoltaic energy production prediction using diverse machine learning models tuned with the chimpanzee optimization algorithm," Scientific Reports, vol. 14, p. 18583, 2024.

[7]X. Huang, Q. Li, Y. Tai, Z. Chen, J. Liu, J. Shi, and W. Liu, "Time series forecasting for hourly photovoltaic power using conditional generative adversarial network and Bi-LSTM," Energy, vol. 246, p. 123363, 2022.