Applied Physics 应用物理, 2025, 15(10), 771-780
Published Online October 2025 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/app
https://doi.org/10.12677/app.2025.1510081

Hans汉斯

光伏电池多峰值最大功率点跟踪控制研究及其仿真模拟

滕敏亮，江先志，张　巍，田芬芳，林建豪，周意诚

浙江腾腾电气有限公司，浙江　温州

收稿日期：2025年9月8日；录用日期：2025年10月15日；发布日期：2025年10月24日

摘　要

本文研究了光伏电池组件在不同光照条件下的非线性输出特性，分别分析了恒压跟踪法、扰动观察法和电导增量法在最大功率点跟踪(MPPT)控制中的性能表现。针对传统MPPT算法在日照快速变化和多峰值特性下追踪效率低、易陷入局部最优的问题，提出了一种基于粒子群优化(PSO)算法的改进型MPPT控制策略。该方法通过粒子间的协同进化，在历史最优和群体最优之间寻求全局最优解，实现对最大功率点的高效准确追踪。实验结果表明，PSO算法在多峰值复杂环境下表现出更高的跟踪精度与动态响应能力，显著优于传统MPPT算法，具有较强的实用价值和推广前景。

关键词

光伏电池，最大功率点跟踪，粒子群算法，多峰MPPT

Research on Multi-Peak Maximum Power Point Tracking Control of Photovoltaic Cells and Its Simulation and Model

Minliang Teng, Xianzhi Jiang, Wei Zhang, Fenfang Tian, Jianhao Lin, Yicheng Zhou

Zhejiang TTN Electric Co., Ltd., Wenzhou Zhejiang

Received: September 8, 2025; accepted: October 15, 2025; published: October 24, 2025

Abstract

This article investigates the nonlinear output characteristics of Photovoltaic (PV) cells under various illumination conditions. To maximize the energy harvesting capability of PV systems, the advantages

文章引用: 滕敏亮, 江先志, 张巍, 田芬芳, 林建豪, 周意诚. 光伏电池多峰值最大功率点跟踪控制研究及其仿真模拟[J]. 应用物理, 2025, 15(10): 771-780. DOI: 10.12677/app.2025.1510081

and limitations of conventional Maximum Power Point Tracking (MPPT) algorithms—including the constant voltage tracking method, Perturbation and Observation (P&O) method, and incremental conductance method—are analyzed. However, under rapidly changing irradiance, PV arrays often exhibit multiple local power peaks, where traditional MPPT algorithms struggle to effectively track the true global Maximum Power Point (MPP). To address this issue, a Particle Swarm Optimization (PSO)-based MPPT control strategy is proposed in this study. The PSO algorithm enables multi-point search by guiding particles toward the global optimum through the integration of individual and collective experience. Simulation results demonstrate that the proposed PSO-based MPPT algorithm can effectively bypass local optima and accurately locate the global MPP, thereby offering superior tracking performance and adaptability compared to traditional methods.

Keywords

Photovoltaic Cell, Maximum Power Point Tracking (MPPT), Particle Swarm Optimization, Multi-Peak MPPT

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

1. 引言

光伏发电是一种将太阳辐射能直接转换为直流电能的可再生能源技术，具有清洁、无噪音、无污染等显著优势。近年来，随着环境保护意识的增强和可持续发展理念的深入人心，加之各国政府对可再生能源产业的政策扶持，光伏发电在全球范围内实现了快速发展并得到广泛应用[1]。目前，光伏发电已成为许多国家实现碳中和目标的重要技术路径之一[2]。

尽管如此，在光伏发电的实际应用与推广过程中，仍面临发电效率不高和系统成本较高等关键问题，制约了其进一步发展。最大功率点追踪(Maximum Power Point Tracking, MPPT)技术作为提升光伏系统能量转换效率的核心手段之一，可使系统在不同光照与温度条件下始终运行于其最优功率点[3]。传统 MPPT 方法主要针对单一峰值功率点进行跟踪，而在实际运行中，由于光照强度变化、阴影遮挡等因素，光伏电池输出特性可能呈现出多峰值特征，此时传统算法性能显著下降。为此，多峰值 MPPT 算法应运而生，不仅提高了发电效率，还可以拓展光伏系统的应用场景与适应能力[4] [5]。

近年来，针对光伏多峰值 MPPT 问题，学者们提出了多种改进的 PSO 变体及智能算法，如混合 PSO、模糊控制结合 PSO、自适应权重 PSO 等方法。这些方法在一定程度上提高了全局搜索能力，但普遍存在参数选择依赖经验、对动态工况适应性不足等问题。本文提出的多区间初始化策略在粒子分布阶段即避免了过度集中现象，显著提升了全局搜索效率。相比现有研究，该方法实现了更高的鲁棒性，且具有较强的自适应扩展潜力，可结合在线检测实现动态参数调整，从而增强工程通用性。

本文的主要贡献如下：(1) 系统分析了光伏电池在多变光照条件下的输出特性，并建立了包含旁路二极管的光伏阵列仿真模型，有效还原实际应用中因局部遮阴而导致的多峰值功率分布；(2) 针对传统 MPPT 算法易陷入局部最优、追踪效率低下的问题，引入粒子群优化算法(PSO)并提出基于多区间初始化策略的改进方案，显著增强算法的全局搜索能力；(3) 通过 Simulink 平台仿真模型，验证了 PSO 算法在不同遮阴工况下的跟踪精度、响应速度和稳定性，证明其优于常规方法；(4) 为复杂运行环境下光伏系统的智能控制策略提供了新思路和技术基础。

2. 光伏电池输出特性及 MPPT 控制概述

当光伏电池受到日照照射时，其内部 PN 结区域附近的价电子会被光能激发，产生大量非平衡态的电子－空穴对。在 PN 结内建电场的驱动下，这些电子和空穴分别向 N 型区和 P 型区迁移，从而形成内部光生电场[6]，如图 1(a)所示。根据电路定义，连接至 P 型半导体的电极被视为光伏电池的正极，连接至 N 型半导体的电极为负极。在电气等效建模中，光伏电池通常被等效为一个感光电流源、与其反向并联的二极管、一个串联电阻以及一个并联电阻，如图 1(b)所示。该等效电路模型可有效描述光伏电池在不同工作条件下的电气特性，并为后续的最大功率点追踪控制算法设计提供理论基础。

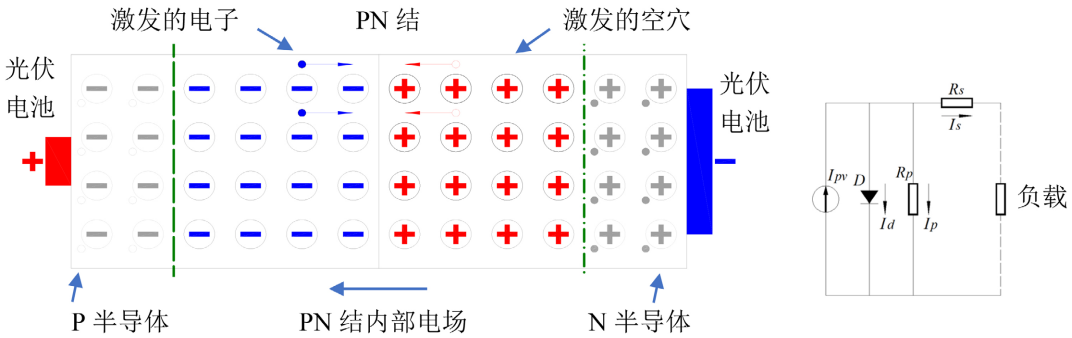

Figure 1. (a) Working principle of a monocrystalline photovoltaic cell; (b) Equivalent circuit of a photovoltaic cell
图 1. (a) 单晶光伏电池工作原理；(b) 光伏电池等效电路

基于光伏电池的工作原理及其等效电路模型，在 Matlab/Simulink 环境中构建了如图 2 所示的光伏电池仿真模型，用以模拟其在不同工况下的输出特性。

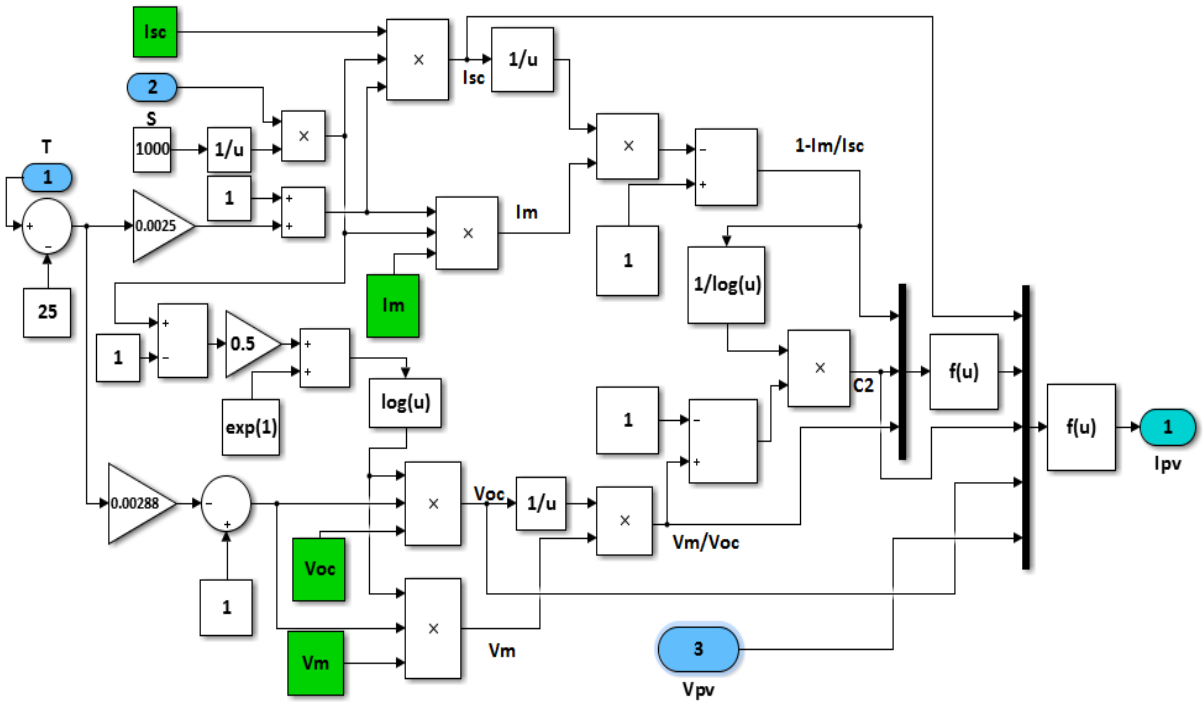

Figure 2. Monocrystalline photovoltaic cell model
图 2. 单晶光伏电池模型

在对光伏电池模型进行封装的基础上，建立了其输出特性模型，如图 3 所示。模型中，T 表示环境温度，S 表示光照强度，V_{pv} 为光伏电池的输出电压，I_{pv} 为其输出电流。

基于图 3 所示的光伏电池输出特性模型，分别设置光照强度为 200 W/m^2 至 1000 W/m^2，温度范围为 25 ℃至 85 ℃，对其输出电压与功率的关系进行了仿真分析。

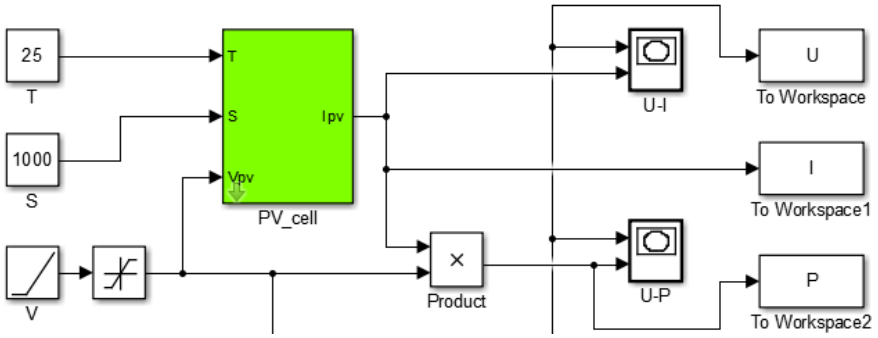

Figure 3. Output characteristics model of monocrystalline photovoltaic cells
图 3. 单晶光伏电池输出特性模型

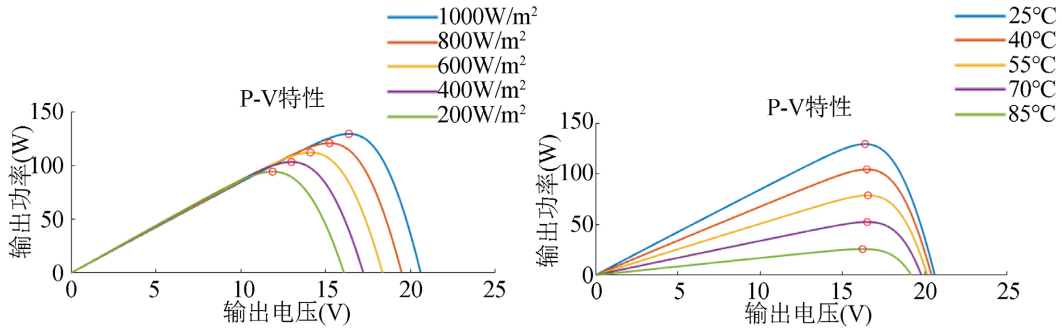

Figure 4. (a) P-V characteristics at 25˚C under different light intensities; (b) P-V characteristics at different temperatures under an irradiance of 1000 W/m^2
图 4. (a) 25℃时不同光照强度时的 P-V 特性；(b) 光强 1000 W/m^2，不同温度下的 P-V 特性

由图 4 可观察到，在不同温度和光照条件下，单晶硅光伏电池的电压－功率(P-V)输出特性均呈现出单峰值特征，该峰值对应的工作点即为最大功率点(Maximum Power Point, MPP)。为了使光伏电池始终工作在该最优点附近、实现发电效率最大化，通常采用最大功率点追踪(Maximum Power Point Tracking, MPPT)控制技术。MPPT 控制算法种类较多，常见方法包括恒压跟踪法、电压/电流扰动观察法和电导增量法等[7]。

恒压跟踪法(Constant Voltage Tracking Method, CVT)通过将光伏板的输出电压保持在一个固定值上来实现光伏板的最大功率跟踪。恒压跟踪法使用起来简单、高效、稳定，但在 MPP 变化时难以有效达到 MPP，且在温度变化稍稍偏大时，会导致过多的功率损失。

电压扰动观察法(Voltage Perturb-and-Observe Method, VP&O)通过周期性地给光伏阵列施加一个小的、恒定大小的电压扰动，通过分析功率增量大小，逐次逼近最大功率点，从而实现最大功率点的追踪控制。电流扰动观察法(Current Perturb-and-Observe Method, CP&O)则是通过对光伏阵列施加一个小的、恒定幅值的电流扰动，并监测输出功率的变化率来实现最大功率点追踪。扰动观察法简单易实现，但若扰动步长过大，但容易在 MPP 附近存在震荡；步长过小时则会出现响应速度慢的问题。

电导增量法(Incremental Conductance, INC)利用光伏电池输出 P-V 特性曲线在最大功率点处斜率为零

的特征来判断当前工作点是否为最大功率点，该方法具有良好的稳态性能及动态效果[8]。

3. 光伏阵列的多功率峰值特性

晶体硅光伏电池的开路电压一般约为 0.5 V。为满足实际应用中对电压和电流的双重要求，常将多个光伏电池板以串联和并联的方式组合，构成电路网格结构。串联连接可提高总电压，并联连接则能增加总电流，从而提升系统输出能力。这种连接方式广泛应用于工业太阳能发电系统、太阳能路灯等设备。图 5 所示为由 36 个光伏电池单体串联组成的光伏电池模组的结构示意图及其对应实物图。

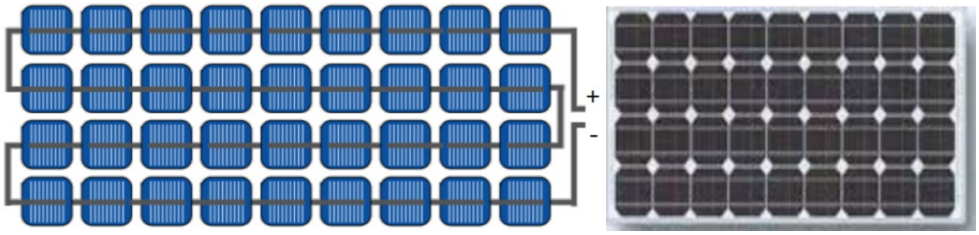

Figure 5. Photovoltaic cell array module
图 5. 光伏电池阵列模组

Figure 6. Hot spot effect
图 6. 热斑效应

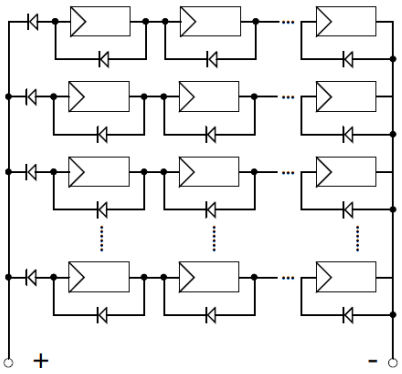

Figure 7. Photovoltaic ARray with bypass diodes W/m^2
图 7. 采用旁路二极管的光伏阵列

光伏阵列在运行过程中，若受到云层、树木或建筑物等物体的局部遮挡，会导致部分光照不足的电池单元无法正常输出电能，甚至成为负载，反向消耗其他单元的电能，从而在局部形成高温，产生热斑效应(Hot Spot Effect)，如图 6 所示。为有效抑制热斑效应，同时防止电能回流，通常在光伏阵列中的各

单元并联安装旁路二极管[9] [10]。图 7 展示了实际光伏阵列中采用旁路二极管后的电池组结构示意图。由于实际应用中，各电池单元所受光照强度常存在差异，加之旁路二极管的作用，会使整个阵列的输出电流被分割为多个区段。其结果是，电流－电压(I-V)曲线在不同电流区间内各出现一个局部峰值，导致电压－功率(P-V)特性曲线呈现出多峰值特征[11]。

4. 多峰值粒子群 MPPT 算法研究及仿真结果

粒子群算法(Particle Swarm Optimization, PSO)是一种基于生物群体智能行为的优化算法，灵感来源于鸟群或鱼群在搜索食物过程中所表现出的协作与信息共享行为。该算法通过模拟粒子在解空间中搜索最优解的过程，广泛应用于解决各种复杂的非线性、多峰值优化问题。算法中，每个粒子代表一个潜在解，粒子在搜索过程中会根据自身的历史最优位置及群体的全局最优位置，持续调整其速度和位置，并通过与其他粒子的交流实现信息共享。通过这种协同进化机制，所有粒子最终趋向于全局最优解或其附近区域[12]。

4.1. 基本算法

粒子群算法中，所有粒子的速度和位置更新遵循以下两个基本公式。

$$v_{ij}(t+1)=w\cdot v_{ij}(t)+c_1\cdot r_1(t)\left[p_{ij}(t)-x_{ij}(t)\right]+c_2\cdot r_2(t)\left[g_j(t)-x_{ij}(t)\right] \tag{1}$$

$$x_{ij}(t+1)=x_{ij}(t)+v_{ij}(t+1) \tag{2}$$

在式中，v_{ij} 和 x_{ij} 分别表示第 i 个粒子在解空间的第 j 个维度上速度和位置。w 是惯性权重，用于保持上一时刻的运动状态；c_1 和 c_2 是加速度常数；r_1 和 r_2 是[0, 1]区间内的随机数，用于增加搜索的随机性；p_{ij} 表示第 i 个粒子所在的位置于第 j 个维度的历史最优位置，而 g 则代表整个粒子群中已发现的全局最优位置。

粒子速度更新公式右侧由三部分组成，分别为惯性权重项、认知因子项和社会因子项。

惯性权重项：用于保持粒子上一时刻的速度状态，有助于粒子沿原有运动轨迹继续搜索，从而避免过早跳出潜在最优解区域，增强算法的全局搜索能力和收敛稳定性。

认知因子项：代表粒子自身向其历史最优位置靠近的趋势。该项通过计算当前粒子位置与其个体最优位置之间的差值，引导粒子在局部空间内进行搜索，有助于发现局部最优解。

社会因子项：表示粒子受整个群体全局最优位置的引导，通过比较当前粒子位置与群体最优位置之间的差异，推动粒子朝群体经验方向收敛，从而实现全局最优解的协同搜索。

由于光伏阵列最大功率点追踪问题属于典型的一维函数寻优问题，因此本研究采用一种结构简单、实现方便的一维粒子群优化算法进行求解。

$$v_i(t+1)=w\cdot v_i(t)+c_1\cdot r_1(t)\left[p_i(t)-x_i(t)\right]+c_2\cdot r_2(t)\left[g(t)-x_i(t)\right] \tag{3}$$

$$x_i(t+1)=x_i(t)+v_i(t+1) \tag{4}$$

4.2. 仿真模型及结果

在第一节模型基础上，在 Simulink 平台中搭建了由 3 块具有旁路二极管的光伏阵列仿真模型，如图 8(a)所示。每块光伏电池的工作温度均设定为 25℃，对应的光照强度分别为 1000 W/m^2、800 W/m^2 和 200 W/m^2。仿真结果显示，系统输出电流呈现三段式特性：a 段为 S1 单独输出，b 段为 S1 与 S2 共同输出，c 段则为三块光伏电池板同时输出，具体分段情况如图 8(b)所示。

在图 8 所示仿真模型的基础上，本文分别针对以下三种不同工况对光伏阵列进行仿真分析。情形 1：单个光伏电池的光照强度设为 1000 W/m^2；情形 2：两个串联电池的光照强度均为 800 W/m^2；情形 3：三个串联电池的光照强度均为 400 W/m^2。各工况下的仿真输出结果如图 9 所示。图 9 可知，当光伏阵列处于局部遮阴状态时，其输出特性曲线将呈现多个最大功率峰值点。传统 MPPT 方法主要针对单峰值特性设计，难以对多峰值情况下的最大功率点进行有效追踪与控制。

以图 9 所示的光伏阵列模型为对象，设置光伏电池串联数为 3，种群规模设定为 6。考虑到每块光伏电池的开路电压为 22 V，为避免粒子群在初始化阶段过于集中，导致搜索过程陷入局部极值点，本文将搜索空间划分为三个区间：[0, 22]、[22, 44]和[44, Voc]，并在每个区间内随机初始化 2 个粒子的位置。与此同时，利用 rand 函数为每个粒子分配一个位于[−10, 10]区间内的初始速度，形成初始解集。上述初始化方式如图 10 所示。

为避免粒子群算法在随机初始化过程中陷入局部极值点，本文选取如下表 1 所示参数设置以增强全局搜索能力。

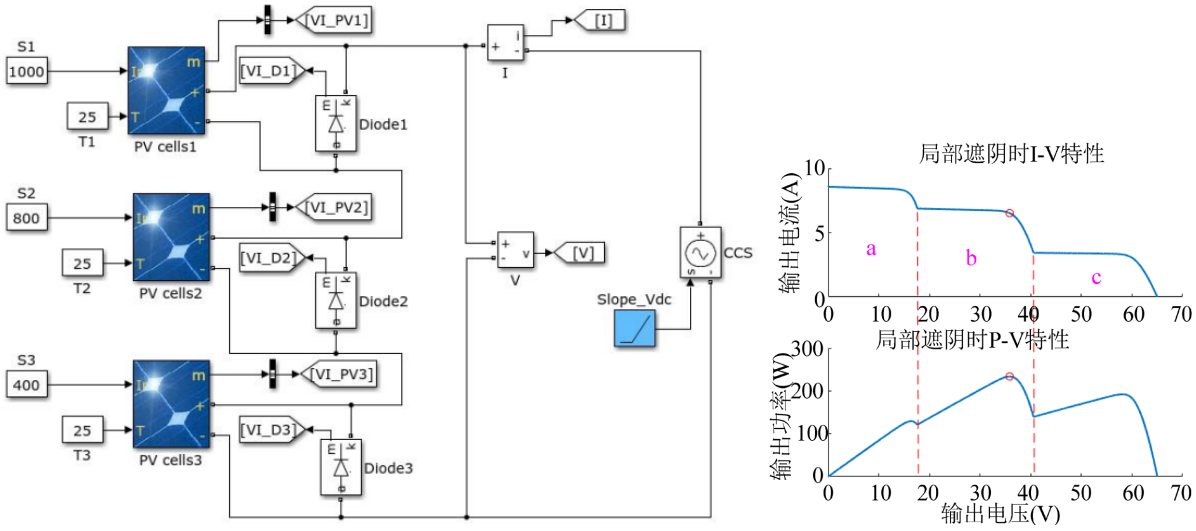

Figure 8. (a) Photovoltaic array simulation model; (b) Output characteristics of the photovoltaic array
图 8. (a) 光伏阵列仿真模型；(b) 光伏阵列输出特性

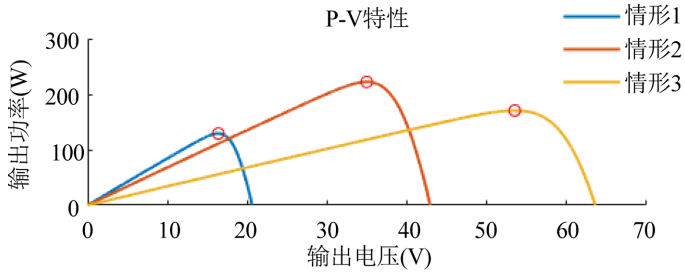

Figure 9. Simulation results of photovoltaic array output characteristics under different light intensity combinations
图 9. 不同光照强度组合下的光伏阵列输出特性仿真结果

为进一步考察算法在动态工况下的适应性，本文设计了动态遮阴场景：在仿真过程中，光照强度由 1000 W/m^2 逐步下降至 400 W/m^2，并随机切换遮阴模式。结果表明，所提算法能够在光照变化时迅速重新搜索并定位 GMPP，表现出良好的动态响应性能。

此外，针对图 9 所示的三种典型遮阴工况(单峰、多峰近似均值分布、强烈不均匀分布)，本文分别测试了改进 PSO 算法的跟踪表现。结果显示，在三类不同分布下，算法均能快速收敛至 GMPP，验证了其在复杂多峰值环境下的广泛适应性。

Table 1. Parameters of the standard particle swarm optimization algorithm applied to multi-peak MPPT
表 1. 应用于多峰值 MPPT 的标准粒子群算法参数

空间维度	1	惯性权重	0.8
学习因子	c1 = c2 = 0.5	种群规模	光伏阵列串联数相关
位置边界	[0, Voc]	速度边界	± 10 V
粒子初始位置	每块电池板电压范围内均分	停止准则	迭代次数决定

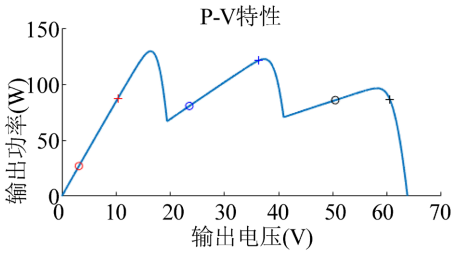

Figure 10. Particle swarm MPPT algorithm initialization
图 10. 粒子群 MPPT 算法初始化

在粒子群算法的迭代优化过程中，本文预设迭代次数为 20 次。每次迭代的计算流程如下：

1) 计算每个粒子当前位置对应的输出功率，即作为适应度函数值；
2) 将当前输出功率与该粒子历史最优输出功率进行比较；
3) 更新每个粒子的个体历史最优值(*pbest*)；
4) 对比所有粒子的个体最优值；
5) 确定并更新整个粒子群的全局历史最优值(*gbest*)；
6) 根据式(3)与式(4)更新粒子的电压变化步长及当前位置(工作点电压)；
7) 依据设定的速度边界与位置边界，对粒子的电压变化步长和工作点电压进行约束。

基于上述算法框架，在 Simulink 平台中编写并实现了粒子群 MPPT 算法的仿真模型，其仿真结果如图 11 所示。图中展示了各粒子在搜索过程中的路径轨迹及最终停留位置。从跟踪轨迹可以观察到，每个粒子的状态演化过程如图所示。仿真结果表明，各粒子有效避开了所有局部极值点，并最终收敛于全局最优解附近，验证了所提出粒子群算法在多峰值条件下具有良好的全局搜索能力和稳定性。

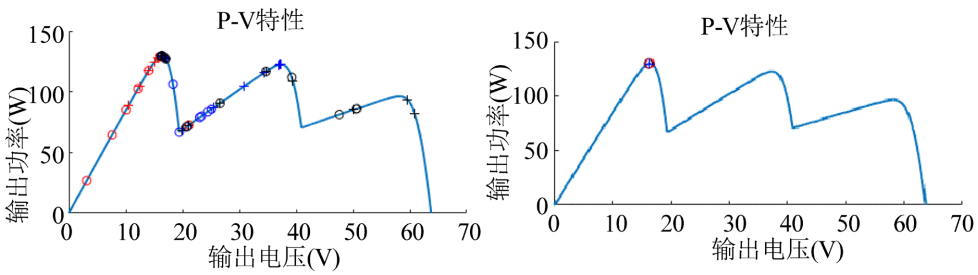

Figure 11. (a) Particle swarm search path; (b) Particle swarm optimization search results
图 11. (a) 粒子群搜寻路径；(b) 粒子群搜寻结果

粒子群 MPPT 算法的输出功率随时间变化的曲线如图 12 所示。在图 12(a)中可见，算法在约 0.13 s 时已成功追踪至最大功率点，响应速度较快。图 12(b)展示了算法的收敛过程，可以观察到在第 8 次迭代时，已有粒子接近全局最优点，说明该算法在多峰值特性下具有良好的收敛性能与全局搜索能力。

进一步对比发现，传统 P&O 算法在多峰值工况下常陷入局部最优，其输出功率比 GMPP 低约 8%~12%；标准 PSO 算法虽能实现全局搜索，但存在响应时间偏长(约 0.18 s)和稳态波动较大的问题。而本文提出的改进 PSO 算法在 0.13 s 左右即可稳定锁定 GMPP，跟踪效率超过 99%，稳态波动幅度控制在 1%以内。由此证明该方法在速度、精度和稳定性方面均优于对比算法。

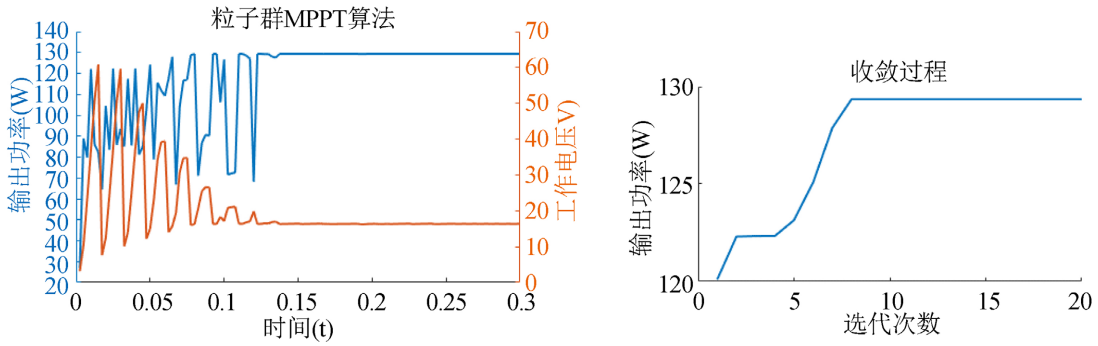

Figure 12. (a) Time-varying curve of the particle swarm MPPT algorithm; (b) Convergence iteration process of the particle swarm MPPT algorithm
图 12. (a) 粒子群 MPPT 算法的时间变化曲线；(b) 粒子群 MPPT 算法的收敛迭代过程

在工程应用方面，本文进一步分析了算法的计算复杂度。以典型的微控制器(主频 72 MHz)为例，单次 PSO 迭代计算耗时约为 0.12 ms，20 次迭代总耗时不足 3 ms，能够满足光伏控制器的实时性需求。相比之下，传统 P&O 算法的单步迭代耗时仅为 0.05 ms，但其易陷入局部最优，整体跟踪效率低于改进 PSO 算法。此外，本文还对 PSO 参数进行了敏感性分析，结果表明惯性权重 w 在 0.7~0.9 范围内、学习因子 c1、c2 在 0.4~0.7 之间时均可保持较高的收敛稳定性，说明算法参数对性能影响相对温和，便于实际工程实现。

5. 结束语

本文研究了光伏阵列的电压－电流－功率特性，并对传统 MPPT 控制算法(如恒压跟踪法、扰动观察法和电导增量法)的原理与优缺点进行了系统分析。在此基础上，建立了串并联光伏电池组的仿真模型，探讨了实际工况下因遮阴引起的最大功率点多峰值特性问题。

针对传统 MPPT 算法在多峰值情况下跟踪性能不足的局限性，本文基于粒子群优化算法(PSO)构建了 MPPT 控制模型，并在 Simulink 平台上进行了仿真实验。仿真结果表明，在合理的参数设置下，粒子群 MPPT 算法能够有效避开局部极值点，快速、准确地追踪到全局最大功率点，显著提升了系统在复杂光照条件下的能量获取能力，为后续光伏系统智能控制策略的研究提供了参考依据。

参考文献

[1] 马翠萍, 史丹, 从晓男. 太阳能光伏发电成本及平价上网问题研究[J]. 当代经济科学, 2014, 36(2): 85-94.

[2] 胡云岩, 张瑞英, 王军. 中国太阳能光伏发电的发展现状及前景[J]. 河北科技大学学报, 2014, 35(1): 69-72.

[3] Xu, Z., Yang, P., Zhou, D., Li, P., Lei, J. and Chen, Y. (2015) An Improved Variable Step Size MPPT Algorithm Based on INC. *Journal of Power Electronics*, **15**, 487-496. https://doi.org/10.6113/jpe.2015.15.2.487

[4] 胥芳, 张任, 吴乐彬, 等. 自适应 BP 神经网络在光伏 MPPT 中的应用[J]. 太阳能学报, 2012, 33(3): 468-472.

[5] Nicola, F., Giovanni, P., Giovanni, S., *et al*. (2013) Power Electronic and Control Techniques for Maximum Energy Harvesting in Photovoltaic System. CRC Press.

[6] 李冬, 张相军. 交错并联 Buck 变换器设计及仿真分析[C]//全国电气自动化与电控系统学术年会. 天津: 电气传动, 2013: 79-81.

[7] 苏文亮. 基于最大功率点跟踪控制算法的光伏充电系统设计及开发[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江理工大学, 2016.

[8] Subudhi, B. and Pradhan, R. (2013) A Comparative Study on Maximum Power Point Tracking Techniques for Photovoltaic Power Systems. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, **4**, 89-98. https://doi.org/10.1109/tste.2012.2202294

[9] 郭长亮, 张素霜, 李铭, 等. 光伏电池数学模型分析及 MPPT 控制仿真[J]. 电源技术, 2014, 38(9): 1640-1643.

[10] 苏秀蓉, 王正仕, 马进红, 等. 基于 MPPT 的太阳能智能充电控制器[J]. 机电工程, 2013, 30(9): 1133-1136.

[11] 杨玉岗, 祁鳞, 李龙华. DC-DC 变换器的交错并联磁集成技术研究综述[J]. 电气工程学报, 2015, 10(8): 1-13.

[12] Pan, Q., Fatih Tasgetiren, M. and Liang, Y. (2008) A Discrete Particle Swarm Optimization Algorithm for the No-Wait Flowshop Scheduling Problem. *Computers & Operations Research*, **35**, 2807-2839. https://doi.org/10.1016/j.cor.2006.12.030