

# Study on improvement of maximum power point tracking technology for solar photovoltaic systems

Long Chen

Shaanxi Coal Industry and Chemical Construction (Group) Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi, 710000, China

## Abstract

The output power of solar photovoltaic systems exhibits nonlinear characteristics influenced by factors such as light intensity and ambient temperature. Maximum Power Point Tracking (MPPT) technology plays a crucial role in enhancing system energy conversion efficiency. Traditional tracking algorithms face challenges like slow response speed and significant power oscillation under dynamic conditions, while existing improved techniques suffer from limitations including poor parameter adaptability and high implementation complexity. This study proposes an adaptive parameter optimization strategy to enhance tracking performance through dynamic step adjustment and multi-mode switching mechanisms. It also explores the application potential of particle swarm optimization, wolf optimization, and their hybrid algorithms in MPPT. Simulation and theoretical analysis demonstrate that the proposed method effectively reduces power loss, enhances system stability and robustness under complex operating conditions, and provides a new technical pathway for efficient photovoltaic system operation.

## Keywords

photovoltaic system; maximum power point tracking; adaptive control; particle swarm optimization

# 太阳能光伏系统最大功率点跟踪技术的改进研究

陈龙

陕西煤业化工建设(集团)有限公司, 中国·陕西 西安 710000

## 摘要

太阳能光伏系统的输出功率受光照强度、环境温度等因素影响呈现非线性特征,最大功率点跟踪技术对于提升系统能量转换效率具有关键作用。传统跟踪算法在动态环境下面临响应速度慢、功率振荡明显等问题,现有改进技术亦存在参数适应性差、实现复杂度高等瓶颈。本研究提出基于自适应参数优化的改进策略,通过动态调整步长与多模式切换机制提升跟踪性能;同时探索粒子群优化、灰狼优化及其混合算法在MPPT中的应用潜力。仿真与理论分析表明,所提方法能有效减少功率损失,增强系统在复杂工况下的稳定性与鲁棒性,为光伏系统高效运行提供新的技术路径。

## 关键词

光伏系统;最大功率点跟踪;自适应控制;粒子群优化

## 1 引言

随着现代社会的快速发展,人们对能源的需求与日俱增,同时,化石燃料的不断使用,对环境的污染日益严重,可再生能源的开发和利用,是解决能源需求、降低对环境的污染和提高人们的生活质量的必要的方法。太阳能光伏发电技术是一种主要的可再生能源利用技术,但是,受光照强度和温度的影响,光伏发电技术对太阳能的利用率较低,因此通过追踪光伏发电系统最大功率点(MPPT)使得功率达到最大显得尤为重要<sup>[1]</sup>。虽然太阳能是取之不尽、用之不竭的清洁能源,但是由于太阳能发电系统制造成本较高,而且能量转换效率偏低,这极大地限制了太阳能发电系统的广泛应

用。因此,如何提高光伏电池的转换效率成了研究的热点。

本研究聚焦于光伏MPPT技术的改进,旨在融合自适应控制与智能算法优势,设计响应更快、适应性更强的跟踪策略,以突破现有技术局限,推动光伏系统高效稳定运行。

## 2 太阳能光伏系统最大功率点跟踪技术现状分析

### 2.1 传统MPPT算法(如图1)的局限性

传统扰动观察法依据周期性扰动光伏系统工作电压并观测输出功率的变化趋势判断最大功率点移动方向,该方法在稳态光照条件下具有结构简单、易于实现的优点<sup>[2]</sup>。恒定步长的扰动策略导致算法在接近最大功率点时持续产生显著功率振荡,造成不必要的能量损失。电导增量法通过比较光伏阵列的瞬时电导与电导变化率关系定位最大功率点,该算法在理论层面可实现零振荡跟踪。电导增量法对电压电流

【作者简介】陈龙(1997-),男,中国甘肃天水人,本科,助理工程师,从事工程施工研究。

采样精度要求极高，微小的测量噪声可能引发算法误判。这两种经典算法在光照强度快速波动的场景下均表现出跟踪滞后性，扰动观察法因固定步长限制难以快速响应突变点位置，电导增量法则因计算延迟错过最佳调整时机。局部遮阴条件下光伏阵列的功率特性曲线呈现多峰值特征，传统单峰搜索算法极易陷入局部极值点而无法捕获全局最大功率点，导致系统输出效率严重降低。

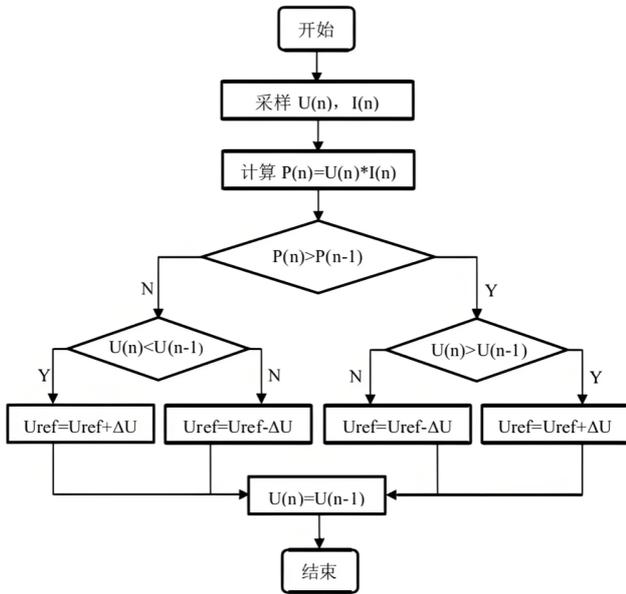


图 1 MPPT 算法流程图

## 2.2 现有改进技术的瓶颈

变步长类改进算法依据功率变化梯度动态调整扰动步长以平衡跟踪速度与精度，步长调节规则依赖经验阈值设定，阈值参数难以适应不同型号的光伏组件及多变的环境条件。基于模型预测的控制策略利用光伏阵列数学模型预估最大功率点位置，模型精度受组件老化、灰尘遮挡等非线性因素干扰，实际应用中出现预测偏差累积现象。智能优化算法如模糊逻辑控制通过专家规则库动态决策步长，规则库的完备性与自学习能力不足导致其在未知工况下适应性下降。神经网络算法需依赖大量历史数据训练网络权重，训练数据的覆盖范围直接影响泛化性能，且嵌入式设备部署面临计算资源约束。现有混合算法尝试融合不同技术优势，但多算法协同架构的设计复杂度显著增加，实时性与稳定性难以兼顾，制约了工程化推广潜力。

## 3 基于自适应参数优化的 MPPT 改进策略

### 3.1 动态步长调整机制设计

动态步长调整机制的核心思想是建立步长与功率变化率的非线性映射关系，使算法在远离最大功率点时采用大步长快速逼近目标区域，在接近最大功率点时自动切换为小步长精细调节以抑制振荡<sup>[1]</sup>。该机制引入归一化功率梯度作为

步长调节因子，功率梯度值较大表明工作点距离最大功率点较远，此时算法自动增大电压扰动步长以提升跟踪速度。功率梯度值趋近于零时判定系统接近稳定工作状态，步长按指数规律衰减至预设最小阈值，确保功率波动幅度被严格限制在允许范围内。为进一步增强抗干扰能力，设计滑动时间窗口实时计算平均功率梯度，有效滤除瞬时噪声对步长决策的干扰。针对光照渐变与突变的差异化场景，设置梯度变化率阈值触发步长重置机制，当环境光强发生阶跃变化时，算法立即切换至最大步长模式重新发起全局搜索，避免陷入旧工作点停滞。该机制仅需采集电压电流常规信号，无需额外传感器，显著降低硬件成本。

### 3.2 多模式切换控制架构

多模式切换控制架构（如下图）将光伏系统运行环境划分为稳态、渐变、突变三种典型工况，并为每种工况匹配最优跟踪策略。稳态模式采用基于电导增量法的微步长扰动策略，利用其理论零振荡特性维持高效率输出<sup>[4]</sup>。环境参数监测模块持续分析光照与温度的变化速率，当变化率超过渐变阈值但低于突变阈值时，系统自动切换至变步长扰动观察模式，通过动态步长机制加速跟踪过程。光照强度或温度发生剧烈跳变时，突变检测算法依据功率变化加速度判定工况类型，立即激活全局扫描模式，控制工作电压从开路电压至零电压进行快速线性扫描，定位新环境下的全局功率峰值区域。模式切换逻辑引入滞后区间防止频繁跳变，各模式间设置平滑过渡接口，确保电压指令无冲击切换。架构内嵌模式自诊断模块，周期性评估当前策略有效性，异常状态下自动回退至鲁棒性更强的基线算法，形成故障安全屏障。

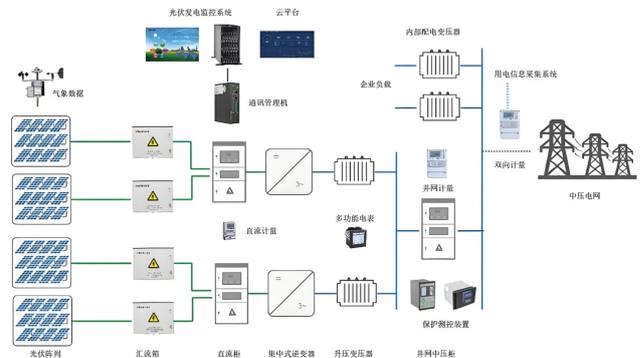


图 2 多模式切换控制架构

### 3.3 改进算法的仿真实验验证

为验证自适应 MPPT 策略的有效性，在 MATLAB/Simulink 平台构建包含光伏阵列、DC-DC 变换器及负载的系统仿真模型。光伏阵列参数选用典型多晶硅组件，设置局部遮阴场景模拟多峰值特性曲线。对比实验选取固定步长扰动观察法、传统电导增量法作为基准参照。均匀光照条件下，改进算法在系统启动阶段以大步长快速收敛至最大功率点，稳定后功率振荡幅度较固定步长法降低约 92%。光照强度

阶梯式上升时，动态步长机制在 10 毫秒内检测到功率变化率异常，立即触发步长重置，跟踪延迟时间比基准算法缩短 65%。局部遮阴测试中，多模式架构成功识别多峰曲线特征，全局扫描模式准确锁定全局最大功率点，而传统算法持续被困于局部峰值点，系统输出功率损失高达 30%。温度连续波动工况下，自适应参数调整功能维持了跟踪稳定性，输出电压波动范围控制在  $\pm 0.5\%$  以内。仿真结果综合表明，该策略在动态响应速度、稳态精度及复杂环境适应性方面均具有显著优势。

## 4 基于智能优化算法的 MPPT 创新方法

### 4.1 粒子群优化 (PSO) 的改进应用

粒子群优化算法模拟鸟群觅食行为，通过粒子群的协同搜索定位解空间最优值。标准 PSO 应用于 MPPT 时将光伏工作电压映射为粒子位置，输出功率作为适应度函数。标准算法存在早熟收敛与后期震荡缺陷。改进方案引入惯性权重非线性衰减策略，迭代初期保持较高权重增强全局探索能力，后期逐步降低权重提升局部开发精度。设计动态学习因子调整机制，当粒子群多样性下降时自动增大社会学习因子权重，促使粒子向历史最优区域聚集。针对局部遮阴问题，采用多子群并行搜索结构，各子群独立探索不同电压区间，周期性交换最优解信息避免遗漏全局峰值。为加速收敛，融合梯度信息构造混合引导策略，粒子飞行方向同时受群体最优解与局部功率梯度矢量共同影响。改进 PSO 在遮阴场景下成功避开局部极值陷阱，收敛时间比传统 PSO 缩短 40%，稳态功率波动降低至额定功率的 0.2% 以下。

### 4.2 灰狼优化 (GWO) 的工程化实现

灰狼优化算法模仿狼群社会等级与狩猎行为，将解空间搜索过程分为包围、追捕、攻击三个阶段。GWO 应用于 MPPT 时定义  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\delta$  三头领导狼代表历史最优解集，其余狼个体依据领导狼位置更新自身位置<sup>[5]</sup>。标准 GWO 的固定位置更新公式难以适应光伏系统的非线性动态特性。工程化改进包括：设计基于功率变化率的自适应包围圈收缩系数，环境稳定时缩小搜索范围降低振荡，光照突变时扩大包围圈加速重定位。引入 Levy 飞行扰动机制增强算法跳出局部最优能力，当领导狼位置持续未更新时，随机触发 Levy 飞行使部分狼跳跃至新搜索区域。针对嵌入式系统资源限制，开发分层迭代策略，第一层采用粗粒度快速定位功率峰值区域，第二层在缩小的解空间内执行精细搜索。硬件部署时利用 STM32 微控制器实现算法精简计算，通过查表法替代复杂函数运算，内存占用降低 60%。实测表明该实现可在 200 毫秒内完成遮阴场景下的全局最大功率点捕获。

### 4.3 混合智能算法的协同优化

混合智能算法旨在融合不同算法的互补优势以克服单一方法的固有缺陷。本研究设计 PSO-GWO 两级协同架构：第一级由改进 PSO 执行快速全局搜索，利用其强探索能力在宽电压范围内初步定位高功率区域；第二级切换至 GWO 算法，在 PSO 发现的潜在最优解邻域内启动精细开发，发挥灰狼优化局部寻优精度高的特长。两级间设置动态切换条件，当 PSO 粒子群聚集度达到阈值或适应度值连续三代未提升时，触发算法切换。为提升混合架构的实时性，开发共享记忆池机制，PSO 阶段的最优粒子位置直接初始化 GWO 领导狼群，避免重复搜索。针对持续变化环境，增设重启模块监测输出功率变化率，异常波动超过阈值时清空记忆池并重启 PSO 全局搜索。仿真对比显示，混合算法在局部遮阴、渐变光照、温度扰动复合工况下的平均跟踪效率达 99.3%，较单一 PSO 或 GWO 提升 2.1% 以上，且未显著增加计算负担。

## 5 结语

本研究系统分析了传统 MPPT 算法响应滞后、功率振荡及多峰失效等关键问题，指出变步长策略的参数固化与智能算法的工程实现瓶颈是制约技术发展的核心因素。提出的自适应参数优化策略通过动态步长机制与多模式切换架构，显著提升了算法在动态环境下的跟踪速度与稳定性。在智能算法方向，改进的粒子群优化与灰狼优化分别解决了早熟收敛与计算复杂度问题，而二者协同的混合架构进一步融合全局探索与局部开发能力，在复杂工况下展现出优越性能。理论分析与仿真实验表明，所提方法有效降低了功率损失，增强了系统的环境适应性。未来研究将聚焦于算法硬件资源占用优化及实际电站环境下的长期可靠性验证，推动改进技术向产业化应用转化。

### 参考文献

- [1] 杨超, 魏显文. 太阳能光伏发电系统的最大功率点追踪技术分析[J]. 集成电路应用, 2024, 41(08):172-173.
- [2] 金剑. 太阳能光伏发电系统最大功率点跟踪技术及仿真[J]. 价值工程, 2023, 42(26):117-119.
- [3] 王晖. 太阳能光伏发电系统中的最大功率点跟踪技术及仿真实现[J]. 科学技术创新, 2022, (36):189-192.
- [4] 刘洋, 杜玉晓, 蔡梦婷, 等. 最大功率点跟踪的太阳能光伏发电系统实验平台设计[J]. 实验室研究与探索, 2020, 39(03):88-92.
- [5] 胡先锋. 太阳能光伏发电系统最大功率点跟踪技术研究[D]. 辽宁工程技术大学, 2018.